

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN
DIFERENTES TIPOS DE VEGETACIÓN EN EL PARQUE
NACIONAL CUMBRES DE MONTERREY**

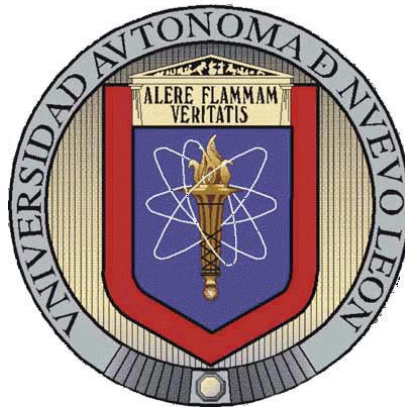
POR

DULCE MARÍA DE LOS ÁNGELES VILLANUEVA HERNÁNDEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Diciembre, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN
DIFERENTES TIPOS DE VEGETACIÓN EN EL PARQUE
NACIONAL CUMBRES DE MONTERREY**

POR

DULCE MARÍA DE LOS ÁNGELES VILLANUEVA HERNÁNDEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Diciembre, 2019

**EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN
DIFERENTES TIPOS DE VEGETACIÓN EN EL PARQUE
NACIONAL CUMBRES DE MONTERREY**

Aprobación de tesis



Dr. José Israel Yerena Yamallel

Director



Dr. Javier Jiménez Pérez

Codirector



Dr. Eduardo Alanís Rodríguez

Asesor



Dr. Sadot Edgardo Ortiz Hernández

Asesor externo

Diciembre, 2019

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Israel Yerena Yamallel por dirigir el presente trabajo, por su apoyo durante este posgrado, las correcciones y comentarios.

Al Dr. Javier Jiménez Pérez por aceptar ser parte de mi comité por sus comentarios y correcciones de este trabajo de tesis.

Al Dr. Eduardo Alanís Rodríguez por formar parte del comité, por sus aportaciones a este proyecto.

Al Dr. Sadot Edgardo Ortiz Hernández por su apoyo durante este proyecto y las facilitaciones para las visitas a campo y por confiarme este proyecto.

Al Dr. Alberto Rojo Alboreca por recibirme como tutor en mi estancia académica, por los comentarios y correcciones en mi trabajo de tesis

A Maykol, Aldo y Jesús por acompañarme a campo y su ayuda en el muestreo.

A Mónica por acompañarme a las salidas al campo y por su amistad durante mi estancia en Linares.

A Ana por su amistad y ayuda en estos dos años, la primera amiga que tuve en la maestría.

A mis padres, Esperanza y Ángel, a mis hermanos, Bianca y Jairo y mi cuñada Ana por el apoyo a la distancia, sus palabras de ánimo, las bienvenidas y despedidas , por estar siempre ahí.

A Adrián por su apoyo durante mi posgrado, sus palabras de aliento y por todo el cariño.

A mi mejor amiga Yesenia por su amistad y tener las palabras adecuadas en todo momento.

A mis amigos Ángel, Carlos, Luis Carlos, Mary Fierro, Mary Mtz., Pablo, Perla, Ricardo, Víctor y Yessica por su amistad todos estos años y su apoyo en este proyecto.

A mis seres queridos y familiares que estuvieron al pendiente de mí.

DEDICATORIA

A mis padres, por todo su amor y cariño, por siempre apoyar mis decisiones aunque muchas veces me alejen físicamente de ellos.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	3
Ciclo del carbono.....	3
Cambio climático	4
Áreas Naturales Protegidas.....	5
Parque Nacional Cumbres de Monterrey.....	6
Bosques templados	6
Inventario Forestal Nacional	7
Características estructurales	9
Biomasa aérea	10
Ecuaciones alométricas.....	11
Ecuación de volumen	14
Contenido y concentración de carbono	16
Carbono almacenado en Áreas Naturales Protegidas.....	18
JUSTIFICACIÓN.....	20
HIPÓTESIS.....	21
OBJETIVOS DEL TRABAJO	21

Objetivo general	21
Objetivos específicos.....	21
MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
Área de estudio	22
Tamaño de muestra.....	24
Diseño de la unidad muestral	24
Parámetros ecológicos	24
Biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas	25
Estimación de biomasa aérea desde el volumen	25
RESULTADOS.....	27
Características estructurales	27
Biomasa aérea arbórea	31
Contenido de carbono	32
DISCUSIÓN	35
CONCLUSIONES	39
BIBLIOGRAFÍA.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste para la ecuación de biomasa.	11
Tabla 2. Parámetros alométricos para estimar la biomasa aérea para <i>P. cembroides</i>	12
Tabla 3. Coeficientes de regresión y coeficientes de correlación para el género <i>Juniperus</i>	13
Tabla 4. Ecuación alométrica generada para <i>Arbutus xalapensis</i>	13
Tabla 5. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa área.....	25
Tabla 6. Concentración de carbono para las especies del estudio.	26
Tabla 7. Parámetros ecológicos de las especies por tipo de vegetación.	30
Tabla 8. Contenido de carbono por tipo de vegetación.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Almacenes en GtC ($1 \text{ GtC}=1 \times 10^{15} \text{gC}$) y flujos en el ciclo del carbono (GtC año^{-1}). Fuente: Rackley, 2017.	4
Figura 2. Diseño de las unidades de muestreo o conglomerado. Fuente: CONAFOR, 2011.	9
Figura 3. Localización geográfica de los tipos de vegetación.	22
Figura 4. Número de individuos por clases diamétricas en el bosque de encino.	27
Figura 5. Número de individuos por clases diamétricas en el bosque de encino-pino.	28
Figura 6. Número de individuos por clases diamétricas en el bosque de pino.	28
Figura 7. Número de individuos por clases diamétricas en el bosque de pino-encino.	29
Figura 8. Biomasa aérea en el estrato arbóreo por tipo de vegetación, según el método de estimación.	32
Figura 9. Contenido de carbono en el estrato arbóreo por tipo de vegetación, según el método de estimación.	33
Figura 10. Distribución del carbono almacenado por clases diamétricas.	34

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

ANP=Áreas Naturales Protegidas

CONABIO= Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

CONAFOR= Comisión Nacional Forestal

CONANP= Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP)

FAO= Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GEI= Gases de Efecto Invernadero

INFyS= Inventario Nacional Forestal y de Suelos

IPCC= Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

IVI= Índice de Valor de Importancia

LGEEPA= La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

PNCM= Parque Nacional Cumbres de Monterrey

SEMARNAT= Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

RESUMEN

Los bosques juegan un papel importante en el ciclo del carbono, por la capacidad de almacenar grandes cantidades de este elemento, a partir de los inventarios forestales se pueden obtener estimaciones de biomasa y carbono. El objetivo de este estudio es evaluar el contenido de carbono en diferentes tipos de vegetación en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Se realizó un inventario en sitios de 400 m², donde se midió el diámetro, la altura y cobertura de copa. Se registraron entre 638 a 725 individuos/ha. Se estimó el número de individuos por categoría para hacer un análisis estructural, resultando que las clases diamétricas tienen una distribución de J invertida. Se calculó el Índice de Valor de Importancia por tipo de vegetación, obteniendo el valor más alto para la especie *Quercus polymorpha* (52.3%) para el bosque de encino, el género *Quercus* (39.9%) para bosque de encino-pino, y para el bosque de pino y pino-encino *Pinus pseudostrobus* con 49.9% y 31.5%, respectivamente. La biomasa obtenida por tipo de vegetación mediante la utilización de ecuaciones alométricas y de volumen fue para bosque de pino-encino 93.1 ± 27.9 Mg/ha y 113.5 ± 18.8 Mg/ha, bosque de encino-pino 117.3 ± 12.4 Mg/ha y 129.2 ± 17.7 Mg/ha, bosque de pino 121.5 ± 14.3 Mg/ha y 89.2 ± 19.4 Mg/ha y bosque de encino 138.0 ± 17.0 Mg/ha y 119.0 ± 31.2 Mg/ha, respectivamente. El bosque de pino fue el único tipo de vegetación que presentó diferencias estadísticas significativas ($P > 0.5$) entre los resultados de biomasa estimada con ecuaciones alométricas y con la ecuación de volumen. Los resultados de contenido de carbono fueron 72.4 ± 10.1 Mg/ha para el bosque de encino, 59.0 ± 5.1 Mg/ha para el bosque de encino-pino, 59.9 ± 7.4 Mg/ha para el bosque de pino y 45.6 ± 13.0 Mg/ha para el bosque de pino-encino. Comparando el contenido de carbono por tipo de vegetación el bosque de pino-encino y el bosque de encino presentaron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.5$). Las estimaciones de biomasa con la aplicación de la ecuación de volumen pueden subestimar o sobrestimar el contenido de carbono, por lo que se recomienda utilizar las ecuaciones alométricas si se dispone de las mismas.

ABSTRACT

Forests play an important role in the carbon cycle, because of the ability to store large quantities of this element, from forest inventories estimates of biomass and carbon can be obtained. The objective of this study is to evaluate carbon content in different types of vegetation in the Cumbres de Monterrey National Park. An inventory was made in 400 m² sites, where the diameter, the height and canopy cover in trees with DBH \geq 7.5 cm were measured. There were between 638 and 725 individuals/ha. The number of individuals per category was estimated to make a structural analysis, resulting in the diametric classes having an inverted distribution of J. The Importance Value Index was calculated by forest type, for the oak forest the specie with the highest values were the *Quercus polymorpha* specie (52.3%), in the oak-pine forest was *Quercus polymorpha* (52.3%) for the oak forest, the *Quercus* genus (39.9%) for the oak-pine forest, and for the Pine and pine-oak forest *Pinus pseudostrobus* with 49.9% and 31.5%, respectively. The biomass obtained by type of vegetation through the use of allometric and volume equations was for pine-oak forest 93.1 ± 27.9 Mg / ha and 113.5 ± 18.8 Mg / ha, oak-pine forest 117.3 ± 12.4 Mg / ha and 129.2 ± 17.7 Mg / ha, pine forest 121.5 ± 14.3 Mg / ha and 89.2 ± 19.4 Mg / ha and oak forest 138.0 ± 17.0 Mg / ha and 119.0 ± 31.2 Mg / ha, respectively. The pine forest was the only type of vegetation that presented significant statistical differences ($P > 0.5$) between the estimated biomass results with allometric equations and with the volume equation. The carbon content results were 72.4 ± 10.1 Mg / ha for the oak forest, 59.0 ± 5.1 Mg / ha for the oak-pine forest, 59.9 ± 7.4 Mg / ha for the pine forest and 45.6 ± 13.0 Mg / ha for the pine-oak forest. Comparing the carbon content by type of vegetation, the pine-oak forest and the oak forest presented significant statistical differences ($P > 0.5$). Biomass estimates with the application of the volume equation may underestimate or overestimate the carbon content, so it is recommended to use allometric equations if they are available.

INTRODUCCIÓN

Las actividades antropogénicas han alterado el ciclo de Carbono (C) a una escala global de forma significativa, los flujos de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico se han alterado al perturbar los almacenes de C (Escobar & Maass, 2008). Tan solo las emisiones de CO_2 causadas por el ser humano por la quema de combustibles fósiles y cambio de uso de suelo aumentaron de 4.7 GtC año^{-1} en los años 60 del siglo XX a $11.3 \text{ GtC año}^{-1}$ en el año 2017 (Le Quéré, 2018).

Los bosques son los ecosistemas terrestres más diversos del planeta y más extensos, y conforman más de un tercio de la flora global (Rzedowski, 1991). En las últimas dos décadas, estos ecosistemas han capturado un tercio de las emisiones de C de la atmosfera en todo el mundo producidas por la quema de combustibles fósiles (Birdsey, Pan & Houghton, 2013). A nivel global la vegetación almacena anualmente 600 PgC , de los cuales 123 PgC son absorbidos a través de la fotosíntesis y 120 PgC son liberados a través de la respiración. Es importante estudiar los bosques y los impactos que tienen las actividades humanas que alteran el ciclo del C, ya que estos ecosistemas pueden fijar este elemento de la atmósfera que de otra forma contribuiría al cambio climático (Ciais et al., 2013).

Para entender la dinámica, la estructura y composición de un bosque son importantes las características estructurales (Alvis, 2009). Para realizar un análisis sobre la distribución horizontal de un bosque es necesario las variables abundancia, dominancia y frecuencia (Jiménez, Aguirre & Kramer, 2001).

Una de las medidas para combatir el cambio climático y conservar los ecosistemas es la creación de Áreas Naturales Protegidas (ANP), en las cuales se limitan las actividades antropogénicas. En México existen 182 ANP federales con una extensión de $908,395.20 \text{ km}^2$ que se encuentran bajo la administración de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2012).

Una de las ANP en México es El Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM) la cual es considerado como una región terrestre prioritaria y una isla biogeográfica. Por el buen estado de conservación del bosque pino y chaparral es considerado de alto valor. También se le asigna una categoría alta en su función como corredor biológico, ya que une áreas de bosque templado con áreas más secas al norte (CONANP, 2006). Este parque cuenta con una superficie de 177,396.48 ha y se estima que almacena 6,113,920 toneladas de carbono en su vegetación (Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón, Alanís-Rodríguez & Yerena-Yamallel, 2013).

ANTECEDENTES

Ciclo del carbono

El ciclo de C es un conjunto de procesos complejos bioquímicos naturales y antropogénicos entre los reservorios que se encuentran en la atmósfera, la biosfera, litosfera y los océanos (Figura 1; Rackley, 2017). El C es esencial para la vida en el planeta, ya que tiene la capacidad de formar moléculas orgánicas al combinarse con otros elementos importantes, como oxígeno, nitrógeno, fósforo e hidrógeno, las cuales son fundamentales para el metabolismo y la reproducción celular (Bruhwiler et al., 2018).

Los ecosistemas terrestres son uno de los depósitos de C más importantes de la biosfera, que se encuentra en la materia orgánica viva, en la necromasa y en la materia orgánica del suelo (Ruíz-Díaz, Rodríguez-Ortiz, Leyva-López & Enríquez-del Valle, 2014). La vegetación es uno de los almacenes más pequeños, sin embargo, junto con la atmósfera forman parte del flujo más grande del ciclo del C (Figura 1). A través de los años la superficie de la mayoría de los tipos de vegetación primaria en México ha disminuido, por prácticas de manejo no sustentable además de cambio de los usos de suelo para actividades antropogénicas (Paz-Pallet et al., 2019).

Este sumidero de C captura este elemento a través de la fotosíntesis y lo retiene en forma de biomasa de las plantas y suelo, y además puede ser trasladado a otros almacenes para evitar ser devuelto a la atmósfera (Casiano-Domínguez, Paz-Pellat, Rojo-Martínez, Covalada-Ocon & Aryal, 2018). Es importante estudiar este almacén y los impactos que tienen las actividades humanas que alteran el ciclo del C, ya que estos ecosistemas ayudan a absorber el CO₂ de la atmósfera que, de otra forma, contribuiría al cambio climático (Ciais et al., 2013).

En la atmósfera el C se encuentra en forma de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). Estos compuestos, entre otros gases, hacen posible el proceso

llamado efecto invernadero en donde se captura el calor en la atmósfera ayudando a regular el clima en la Tierra (Corominas, 2014). En este reservorio se encuentra una estimación de 850 GtC (Figura 1).

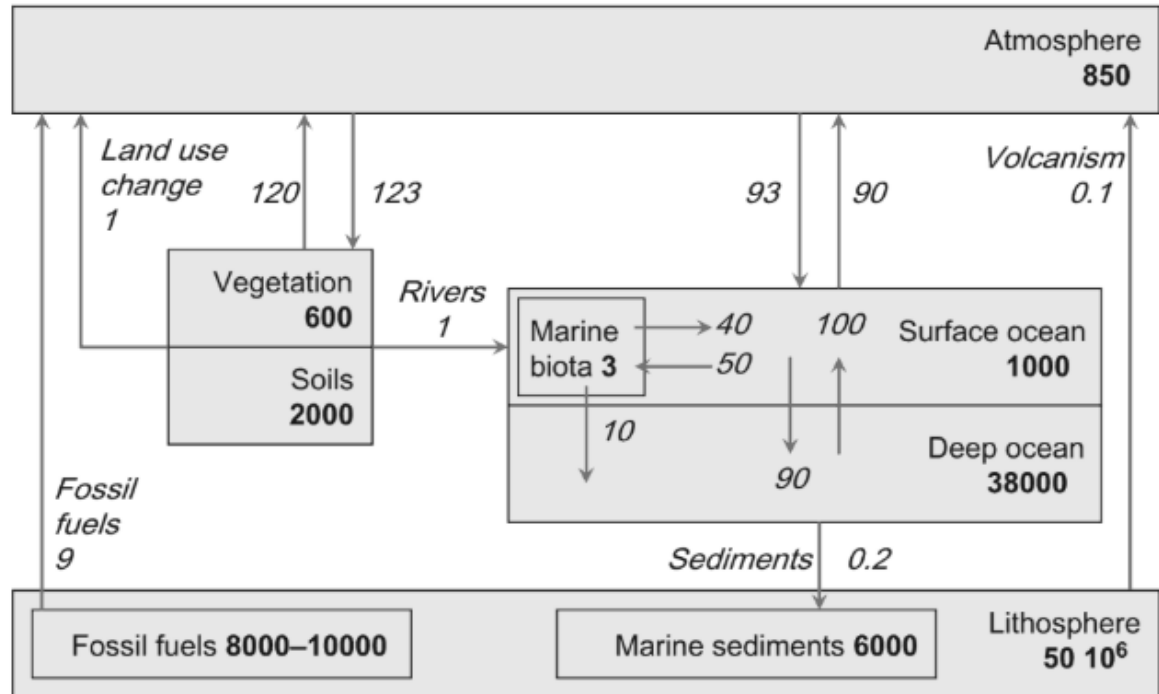


Figura 1. Almacenes en GtC (1 GtC=1x10¹⁵gC) y flujos en el ciclo del carbono (GtC año⁻¹). Fuente: Rackley, 2017.

Cambio climático

Se conoce como cambio climático a las variaciones del clima a nivel global. Estas se miden en diferentes escalas de tiempo y parámetros climáticos como temperatura, precipitaciones, vientos y eventos climáticos extremos entre otros, pudiendo ser producidos por causas naturales y antropogénicas (Gaioli & Blazquez, 2016). No obstante, existe una discusión en la definición de cambio climático, en cuanto si las actividades antropogénicas se debieran de incluir o no (Forero-Cantor, Saldarriaga-Muñoz & Vargas-Romero, 2017). A pesar de esta diferencia de opiniones, los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI) causados por emisiones antropogénicas han aumentado desde el periodo preindustrial (1850-1900), lo que ha provocado concentraciones de CO₂, CH₄ y

óxido de nitrógeno (NOx) sin comparación en por lo menos 800,000 años (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2014).

Entre los GEI, además de CO₂, CH₄ y NOx, están el vapor de agua y el ozono (O₃). Estos gases se encuentran de forma natural, sin embargo, debido actividades antropogénicas han aumentado provocando el cambio climático. Entre las causas que producen un aumento de los GEI por el ser humano se encuentran las actividades industriales, la quema de combustible y practicas no ecológicas como la quema de maleza (Valderrama-López et al., 2018).

Según el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, entre 1880 y 2012 hubo un aumento en el calentamiento global de 0.85 °C (IPCC, 2013). En el 2018, el IPCC realizó un reporte sobre los impactos del calentamiento global promedio de 1.5 °C por encima del periodo preindustrial, y estimaron que esta temperatura se alcance entre el año 2030 a 2052 si se continua con el ritmo actual. Entre las consecuencias de este escenario destacan: la disminución de cantidad y calidad de agua dulce superficial y subterránea, sequia e inundaciones, erosión del suelo, carga de sedimentos, cambios en la fenología, cambios en el rango de distribución de especies, abundancia y extinción, cambios en las funciones del ecosistema, biomasa y reservas de carbono.

El aumento de 1.5 °C es algo inevitable, sin embargo, las tasas de emisiones de GEI es lo determinante, por lo que, si se lograra reducir las emisiones antropogénicas a cero, sería posible que el calentamiento global promedio fuera por debajo de 0.5 °C en un siglo, a diferencia de la proyección de 1.5 °C en las próximas dos o tres décadas (Allen et al., 2018).

Áreas Naturales Protegidas

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA, 2018) define a las Áreas Naturales Protegidas (ANP) como las zonas que no han sido alteradas significativamente de su estado original por el ser humano o requieren ser preservadas y restauradas. Dentro de estas áreas se consideran regiones terrestres, costeras y acuáticas.

La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) es el órgano encargado de la administración de ANP en México. Actualmente existen 182 ANP en el país, que representan el 11.14 % de la superficie terrestre nacional y el 22.05 % de la superficie marina del territorio nacional. Las ANP se clasifican en seis categorías: Parques Nacionales, Reservas de la Biosfera, Áreas de Protección de Flora y Fauna, Santuarios, Áreas de Protección de Recursos Naturales y Monumentos Naturales.

Las ANP son una herramienta importante para proteger la riqueza biológica y cultural (Jiménez-Sierra et al., 2014) y a pesar de esto, en México, presentan problemáticas en diferentes áreas principalmente en una falta o mala gestión de los recursos económicos y humanos (Pinkus-Rendón, Pinkus-Rendón & Ortega-Rubio, 2014), dificultando lograr los objetivos de su protección.

Parque Nacional Cumbres de Monterrey

El Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM) es decretado en el año 1939 con una extensión superficial de 229,685 ha, de las cuales el 19.4% se encontraba dentro del Área Metropolitana de Monterrey. Posteriormente se realizó una modificación en el año 2000, reduciendo el área a 177,395 ha (Valdez-Tamez, Foroughbakhch-Pournavab & Garza, 2004).

Esta ANP forma parte de la Sierra Madre Oriental, se localiza en el centro del estado de Nuevo León, abarcando ocho municipios: Allende, García, Montemorelos, Monterrey, Rayones, Santa Catarina, Santiago y San Pedro Garza García. Tiene una clasificación de región terrestre prioritaria y es considerada como un área de importancia para la conservación de las aves (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2016).

Bosques templados

La vegetación de un ecosistema está determinada principalmente por el clima. En los bosques se caracteriza por vegetación arbórea de climas templados, a diferencia de las selvas que se caracteriza por un clima cálido, lo que permite una gran diversidad de especies en comparación con los bosques

en donde se compone por una o dos especies, principalmente coníferas y en ocasiones latifoliadas (Granados-Sánchez, López-Ríos & Hernández-García, 2007).

Los bosques de encino y los pinares constituyen la mayor parte de la cobertura vegetal de áreas de clima templado y semihúmedo, existiendo relaciones complejas entre estos dos tipos de bosques, por lo que son muy comunes los bosques mixtos de *Quercus* y *Pinus* (Rzedowski, 2006).

Por el alto interés de los recursos forestales, en México los bosques templados son susceptibles a deforestaciones, principalmente del género *Pinus* (Gómez-Romero & Linding-Cisneros, 2016).

Inventario Forestal Nacional

Para obtener información confiable de un bosque es necesario la realización de inventarios forestales (Orzoco & Brumér, 2002), los cuales ayudan a cuantificar la biomasa o volumen, ya sea para su aprovechamiento o conservación. Estos inventarios pueden realizarse a diferentes escalas espaciales (nacional, estatal o regional) y temporales según sea su objetivo.

En México se han realizado cinco inventarios forestales nacionales, el Primer Inventario Nacional Forestal (1961-1985) fue realizado con el apoyo de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), tuvo como objetivo delimitar las zonas comerciales o potencialmente comerciales desde el punto de vista maderable (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2011). El segundo fue el Inventario Nacional Forestal de Gran Visión (1991-1992), en el que no se realizó trabajo de campo, y cuyo objetivo fue tener una actualización a bajo costo mediante el procesamiento de imágenes de satélite NOAA-AVRR, de baja resolución, generando información a una escala de 1:1 000 000 (CONAFOR, 2012).

En 1994 fue publicado el Inventario Nacional Forestal Periódico (1992-1994), en el cual se utilizaron imágenes de satélite de mediana resolución y se crearon mapas territoriales a una escala de 1:250 000 (SEMARNAT, 2016). El

Inventario Nacional Forestal fue realizado en el 2000 por la Universidad Autónoma de México (UNAM) en colaboración del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y financiado por la SEMARNAT (en ese entonces Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca [SEMARNAP]), en donde se actualizó la cartografía de vegetación y suelo serie II (Velázquez et al., 2001).

El Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) es un instrumento técnico que sirve para identificar, caracterizar y cuantificar los recursos forestales en México con el fin de un adecuado manejo, fomento, aprovechamiento y conservación de los recursos naturales. La metodología y técnicas se homologaron a las de Canadá y Estados Unidos para poder reportar información acerca del estado de los recursos forestales a la FAO (CONAFOR, 2009).

En 2004-2009 se realizó el primer ciclo del INFyS, dando inicio a un programa de inventarios forestales con una metodología homogénea y una actualización periódica, establecida cada cinco años. El segundo ciclo del INFyS abarcó el periodo del 2009-2014, pesentando por primera vez un análisis de la dinámica del ecosistema como cobertura de dosel, biomasa existente, carbono almacenado y volumen (CONAFOR, 2018). El tercer ciclo es el más reciente, inició en el 2015 y tiene como meta terminar en el 2019. Este ciclo de medición se realiza de tipo modular, es decir, se recolecta información de las variables vinculadas en un tema (CONAFOR, 2015).

Las unidades de muestreo se basan en conglomerados, los cuales contienen cuatro sitios. El sitio 1 se encuentra en el centro del conglomerado, los sitios 2, 3 y 4 se encuentran a una distancia de 45.14 m del centro del sitio 1 con un azimut de 0°, 120° y 240 respectivamente (figura 2).

Cada sitio tiene un área de 400 m² (radio= 11.28 m) donde se miden árboles con diámetro mayor a 7.5 cm, un subsitio de 12.56 m² (radio= 2 m) donde se registra el renuevo, individuos con un diámetro normal menor a 7.5 cm, y por último un subsitio cuadrado de 1 m² (L= 1m) donde se registran hierbas, helechos,

musgo y líquenes. En el sitio 3 se realizan transectos de muestreo de información de combustibles forestales.

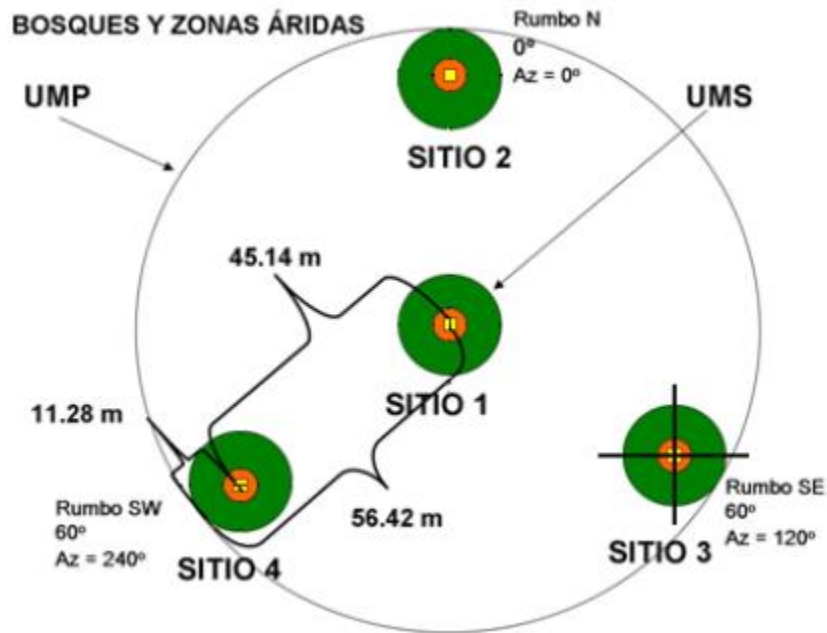


Figura 2. Diseño de las unidades de muestreo o conglomerado. Fuente: CONAFOR, 2011.

Características estructurales

Las características estructurales son fundamentales para entender la distribución y dominancia espacial de las especies forestales (Olvera-Vargas & Figueroa-Rangel, 2012). Además, son útiles para la toma de decisiones en el manejo forestal y donde se puede apreciar los procesos de sucesión ecológica y los efectos antropogénicos (López-Hernández, Aguirre-Calderón, Alanís-Rodríguez, Monarrez-Gonzalez, González-Tagle & Jiménez-Pérez, 2017).

El Índice de Valor de Importancia (IVI) fue creado por Curtis y McIntosh (1951). Está basado en una ponderación que toma en cuenta el promedio de la dominancia relativa, densidad relativa y frecuencia relativa, otorgando mayor valor a las especies que dominan al ecosistema, aportando elementos cuantitativos fundamentales en el análisis ecológico (Lozada-Dávila, 2010).

Biomasa aérea

La biomasa se puede dividir en dos componentes: aérea y subterránea. La aérea es toda la biomasa viva sobre el suelo (tallo, tocón, ramas, corteza, semillas, follaje) y la subterránea es la de raíces vivas, en ambos casos expresadas en toneladas de peso seco (Nabuurs et al., 2003).

La cuantificación de la biomasa forestal, en especial la arbórea, juega un papel clave en el manejo forestal sostenible (Cutini, Chianucci & Manetti, 2013). Esta estimación ayuda al entendimiento de la dinámica de los flujos y nutrientes, permite evaluar las posibilidades energéticas e industriales al ser materia prima para sus procesos, es parte esencial para los estudios de combustibles forestales para determinar el riesgo de incendios y, por último, ayuda a cuantificar el almacenamiento o secuestro de carbono (Diéguez-Aranda et al., 2009).

Los métodos para estimación de biomasa aérea se pueden dividir en dos: directo e indirecto. El método directo también conocido como de cosecha o destructivo, es aquel en el que es necesario cortar, secar y pesar el individuo. Es un procedimiento sencillo de aplicar, pero sin embargo requiere mucho tiempo (Nordh & Verwijis, 2004), los costos son elevados y se vuelve tedioso (Marcos-Robles, 2016) en comparación de los métodos indirectos.

Los métodos indirectos son aquellos que estiman la biomasa de un árbol con ecuaciones o modelos matemáticos por medio de análisis de regresión entre variables de los árboles, como diámetro a la altura de pecho (DAP), la altura comercial y altura total, el área basal, crecimiento dimétrico y la densidad específica de la madera (Fonseca-González, 2017).

Para tener datos precisos en la estimación de biomasa y/o carbono es recomendable la aplicación de métodos directos, sin embargo, esto depende de los recursos que se tienen y las condiciones de los ecosistemas (Ruiz-Díaz, Rodríguez-Ortiz, Lyva-López & Enríquez-del Valle, 2014).

Ecuaciones alométricas

Para obtener las estimaciones de biomasa por unidad de superficie es necesario las estimaciones por individuo a partir de las relaciones alométricas en una parcela (Aguirre-Salado et al., 2009). Al realizar estas estimaciones indirectas se puede calcular la cantidad de C fijado por las especies, información que contribuye a fortalecer el manejo sustentable de los boques (Montoya et al., 2018).

Las ecuaciones alométricas son la herramienta más utilizada para la estimación de volumen o biomasa (Rojas-García, De Jong, Martínez-Zurimendi & Paz-Pellat, 2015), y se basan en información dasométrica obtenida en inventarios como el diámetro, la altura y la densidad (Birdsey et al., 2013).

Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011) desarrollaron ecuaciones alométricas de biomasa en función del diámetro normal para *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote* y *Quercus* spp. en los bosques templados del sur de Nuevo León. La función que presentó mejor ajuste fue la que estimó la biomasa en función del diámetro normal (Tabla 1):

$$b = \beta_1 \cdot d^2$$

donde:

b = biomasa (kg)

d = diámetro normal (cm)

β_1 = parámetro del modelo

Tabla 1. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste para la ecuación de biomasa.

Especie	β_1	Error estándar	Valor de t	Pr> t	REMC	R ²
<i>Pinus pseudostrobus</i>	0.35179	0.03102	11.34	<0001	64.202	0.941
<i>Pinus teocote</i>	0.40196	0.03320	12.11	<0001	77.838	0.948
<i>Quercus spp</i>	0.45534	0.02683	16.97	<0001	92.095	0.947

β_1 = parámetro del modelo; Pr= nivel de significancia de β ; REMC= raíz del error medio cuadrático.

Marroquín-Morales, Méndez-González, Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón y Yerena-Yamallel (2018) ajustaron modelos alométricos para *Pinus cembroides*

y *Pinus halapensis* en bosque de pino en Saltillo, Coahuila. En este estudio se midieron árboles de *P. cembroides* con diámetros de 6.1-11.0 cm y alturas entre 4.4 a 22.9 m. Para esta especie el modelo con mejor ajuste fue polinomial de grado 2 (Tabla 2):

$$\ln b = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d) + \beta_2 \cdot \ln(d)^2 + \varepsilon$$

donde:

\ln = logaritmo natural

b = biomasa (kg)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = parámetros de regresión

d = diámetro normal (cm)

Tabla 2. Parámetros alométricos para estimar la biomasa aérea para *P. cembroides*.

Especie	β_0	EE	β_1	EE	β_2	EE
<i>Pinus cembroides</i>	5.078	1.59	-3.764	1.51	1.28	0.35

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = parámetros estimados; EE = error estándar de los parámetros.

Avendaño-Hernández, Acosta-Mirales, Carrillo-Anzures y Etchevers-Barra (2009) ajustaron modelos matemáticos para estimar la biomasa área de la especie *Abies religiosa*. En este estudio se seleccionaron 26 árboles, donde se trató de incluir todas las clases diamétricas. El siguiente modelo mostro el mejor ajuste, con 0.99:

$$b = 0.0713 \cdot d^{2.5104}$$

donde:

b = biomasa área (kg)

d = diámetro normal (cm)

Grier, Elliott y McCullough (1992) desarrollaron ecuaciones alométricas para especies de *Pinus* y *Juniperus* en base a ramas, follaje y biomasa total del árbol. El modelo trabajado fue:

$$\log b = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log d$$

donde:

b = biomasa (kg)

β_0, β_1 = parámetros de regresión

d = diámetro (cm)

Tabla 3. Coeficientes de regresión y coeficientes de correlación para el género *Juniperus*.

Especie	β_0	β_1	R^2	S^2	n
<i>Juniperus</i>	1.157	2.086	0.94	0.0232	21

β_0, β_1 = coeficientes de regresión, R^2, S^2 = coeficientes de correlación, n= número de muestras.

Aguilar-Hernández, García-Martínez, Gómez-Miraflor y Martínez-Gómez (2016) generaron una ecuación alométrica para *Arbutus xalapensis* en el Estado de México. En este estudio se midieron 13 árboles con diámetros de un rango de 2.1 cm a 56.7 cm, y esta ecuación se ajustó al modelo polinómico de orden 2 (Tabla 4).

Tabla 4. Ecuación alométrica generada para *Arbutus xalapensis*.

Ecuación	Muestra	R^2	SE
$b = 0.3764 \cdot d^2 - 2.3146 \cdot d - 1.9106$	13 árboles	99.5	24.9

d = diámetro normal (cm), b = biomasa (kg), SE= error típico de la estimación, R^2 = coeficiente de determinación.

Chojnacky, Heath y Jenkins (2013) recopilaron y analizaron 675 ecuaciones alométricas publicadas para la estimación de biomasa área en árboles de Estados Unidos. Estas ecuaciones fueron agrupadas en coníferas, maderas duras y bosque, a su vez se identificaron por taxones y después del meta-análisis se tuvieron un total de 13 ecuaciones para coníferas, 18 para maderas duras y 4 para bosques. La ecuación para determinar la biomasa de todas las especies es la siguiente:

$$\ln(b) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d)$$

donde:

β_0, β_1 = parámetros de regresión

b = biomasa (kg)

d = diámetro normal (cm)

Ecuación de volumen

Además del valor ecológico que tienen los bosques, la extracción de madera tiene un impacto económico muy importante en la sociedad, por lo que la estimación del volumen forma un papel importante y muy común en biometría forestal (Quiñónez-Barraza, Cruz-Cobos, Vargas-Larreta & Hernández, 2012).

Otra forma de estimar la biomasa aérea es a partir de estimaciones de volumen, tradicionalmente se calcula el volumen total de árboles individuales mediante un modelo que considera el diámetro normal y la altura total.

$$b = v \cdot dm \cdot F_{exp}$$

donde:

b = biomasa aérea

v = volumen del árbol

dm = densidad de la madera

F_{exp} = factor de expansión (sin dimensión) relación entre biomasa total y biomasa de fuste.

El volumen del árbol (v) se calcula como:

$$v = (\pi/4) \cdot d^2 \cdot h \cdot f$$

donde:

v = volumen del árbol

d = diámetro a la altura de pecho o DAP (1.30 m)

h = altura del árbol

f = factor de forma

El peso es una de las principales relaciones que tiene la densidad de la madera (Ordóñez-Díaz, Galicia-Naranjo, Venegas-Mancera, Hernández-Tejeda, Ordóñez-Díaz & Dávalos-Sotelo, 2015). Este parámetro se determina a partir del peso seco y el volumen húmedo.

Sotomayor, Herrera y León (2003) recabaron información sobre la madera de 100 especies mexicanas para realizar su clasificación mecánica, en la que la densidad fue el indicador más confiable del estudio. Aguilar-Rodríguez, Abundiz-Bonilla y Barajas-Morales (2001) determinaron la densidad de la madera de especies de una comunidad del bosque mesófilo de montaña en México, y encontraron valores que van desde los 0.40 a 0.83 g cm⁻³.

Ordóñez-Díaz et al. (2015) recabaron información sobre la densidad de la madera de 636 especies de México en 10 tipos de vegetación diferentes, identificaron 738 especies para las que no se había determinado su densidad y calcularon la densidad mínima, promedio y máxima de los tipos de vegetación estudiados. Entre las vegetaciones estudiadas se encuentran el bosque de coníferas y el bosque de *Quercus*.

Silva-Arredondo y Návar-Cháidez (2012) estimaron la densidad de la madera de árboles del género *Pinus* y *Quercus* en bosques templados del estado de Durango, México. Obtuvieron valores para *Pinus* que van de 0.40 a 0.52 g cm⁻³ con un promedio de 0.47 g cm⁻³ y para *Quercus* valores entre 0.61 a 0.86 g cm⁻³ con una media de 0.77 g cm⁻³.

De la Paz Pérez-Olvera y Dávalos-Sotelo (2008) determinaron características anatómicas, físicas y mecánicas de 24 especies de encinos de diferentes estados de México. La densidad de las especies varió entre 0.579 y 0.767 g cm⁻³.

El factor de expansión es otra variable en la determinación de biomasa a partir del volumen, que se utiliza para obtener una estimación de biomasa de todos los componentes de los árboles como raíces, hojas y ramas (Domínguez-Cabrera, Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, Rodríguez-Laguna & Díaz-Laguna, 2009). Este factor depende de variables como diversidad, edad, características estructurales y la estación (Silva-Arredondo & Návar-Cháidez, 2010). La fórmula para estimar el factor de expansión es la siguiente:

$$F_{exp} = (b_f + b_r + b_h)/b_f$$

donde:

F_{exp} = factor de expansión

b_f = biomasa del fuste

b_r = biomasa de ramas

b_h = biomasa de hojas

Domínguez-Cabrera, Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, Rodríguez-Laguna y Díaz-Laguna (2009) determinaron factores de expansión para *Pinus pseudostrobus*, *Pinus teocote* y *Quercus spp* del bosque del sur del estado de Nuevo León, en promedio se obtuvieron valores de 1.373, 1.394 y 1.511 respectivamente.

El coeficiente mórfico o factor de forma (f) es la relación que existe entre el volumen real del tronco y el modelo que se toma como referencia; este coeficiente es una herramienta eficiente y precisa para estimación de volumen de árboles en pie (García-Espinoza, Garcia-Magaña, Hernández-Ramos, Muñoz-Flores, García-Cuevas & Hernández-Ramos, 2016), y en la practica el factor de forma varía entre 0 a 1.

Contenido y concentración de carbono

El almacenamiento neto de C orgánico en los bosques depende del manejo dado a la cobertura vegetal, edad, distribución de tamaños, estructura y composición de ésta (Razo-Zárate et al., 2013). Se ha reportado que en promedio la concentración de carbono va desde los 0.40 hasta los 0.55 (Ruiz-Díaz et al., 2014).

Yerena, Jiménez, Aguirre, Treviño y Alanís (2012) cuantificaron la concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas de los estados de Nuevo León y Coahuila. Obtuvieron una media de 48.39%, siendo la especie

con menor concentración de carbono *Pinus remota* (Little) con 45.67%, y la especie con valor más alto *Juniperus flaccida* Schltdl, con 51.18%.

Jiménez, Treviño y Yerena (2013) estimaron la concentración de carbono total en la biomasa aérea por componente (hojas, ramas, corteza y fuste) en seis especies representativas (*Pinus pseudostrobus*, *J. flaccida*, *Quercus laceyi*, *Quercus rysophylla*, *Quercus canbyi* y *Arbutus xalapensis*) del bosque de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. Reportaron que la especie con más alto concentración de carbono fue *J. flaccida* (51.18%) y con concentración más baja fue *Q. rysophylla* (47.98%). En promedio, por grupos de especies, resultó que las coníferas tuvieron una concentración de 50.76% y las latifoliadas de 48.85%.

Galeana-Pizaña, Ordóñez-Díaz y Corona-Romero (2013) estimaron el contenido de carbono en la biomasa aérea con ayuda de ecuaciones alométricas y volumétricas en diferentes bosques de la cuenca del río Magdalena en México. Estos bosques son irregulares en cuanto a la edad, por lo que obtuvieron una variación de carbono desde 6.25 hasta 362.20 Mg C ha⁻¹. En promedio el bosque con mayor contenido de carbono fue el de *Abies religiosa* cerrado (162.91 ± 16.69 Mg C ha⁻¹), mientras que el bosque de *Pinus hartwegii* abierto fue el que tuvo menor cantidad (21.21 ± 5.62 Mg C ha⁻¹).

Domínguez-Cabrera, Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, Rodríguez-Laguna y Díaz-Balderas (2009) determinaron la biomasa en bosques del Sur de Nuevo León, México, con ayuda de ecuaciones alométricas. Obtuvieron valores de biomasa por especie que varían entre 5.54 a 119 Mg ha⁻¹ en el bosque de pino, entre 13.34 a 99.24 Mg ha⁻¹ en bosque de encino-pino y el de pino-encino presentó valores de 7.78 a 79.11 Mg ha⁻¹.

Návar-Cháidez (2010) estudió los bosques templados del estado de Nuevo León. Las estructuras diamétricas muestran masas irregulares, presentado una proximidad a la típica J invertida. En promedio los volúmenes de rollo total (tocón, fuste y ramas) resultaron en 115 m³ ha⁻¹ (± 26.5 m³) y la densidad de biomasa

aérea promedio a partir de ecuaciones alométricas fue de 74.16 Mg ha^{-1} ($\pm 11.89 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011) evaluaron el contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. Reportan que el porcentaje de carbono en los individuos de *P. pseudostrobus* fue 50.35%, en *P. teocote* 47.78% y en *Quercus spp.* 48.43%. Las estimaciones del contenido de carbono fueron: pino-encino 45.24 Mg ha^{-1} y encino-pino 64.20 Mg ha^{-1} .

Rodríguez-Laguna, Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón y Jurado-Ibarra (2007) generaron ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en cinco especies (*J. flaccida*, *P. pseudostrobus*, *Q. cambyi*, *Q. laceyi* y *Q. rysophylla*) en un tipo de vegetación de encino-pino en Iturbide, N.L. Usaron el modelo de regresión potencial y obtuvieron coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.97 para cada especie.

Silva-Arredondo y Návar-Chávez (2009) determinaron la concentración de carbono para especies del género *Pinus spp* y *Quercus spp*. Los resultados fueron para *Pinus spp* de 0.56 y *Quercus spp* de 0.54 con una desviación estándar de 0.0373 y 0.038, un intervalo de confianza ($p=0.05$) de 0.0256 y 0.052 respectivamente.

Carbono almacenado en Áreas Naturales Protegidas

Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón, Alanís-Rodríguez y Yerena-Yamallel (2013) estimaron el contenido de carbono en el PNCM con información recabada en el laboratorio de carbono de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León y mediante literatura. Como resultados obtuvieron que los bosques templados almacenan $48.8 \text{ Mg C ha}^{-1}$ en toda la superficie, la vegetación primaria de estos bosques almacena $51.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$ y la vegetación secundaria $42.2 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Dentro de la vegetación primaria de los bosques se tiene el bosque de oyamel ($58.9 \text{ Mg C ha}^{-1}$), bosque encino ($48.6 \text{ Mg$

C ha⁻¹), bosque encino-pino (58.1 Mg C ha⁻¹), bosque pino (60.8 Mg C ha⁻¹) y bosque pino-encino (44.6 Mg C ha⁻¹).

Mendoza-Ponce y Galicia (2010) cuantificaron la biomasa aérea y subterránea y el almacenamiento de carbono a partir de ecuaciones alométricas en diferentes tipos de bosques templados en Cofre de Perote, Veracruz, México. La biomasa total (árbol, hojarasca y raíces) varió entre 91.07 y 383.78 Mg ha⁻¹. La biomasa aérea obtuvo valores de 73.63 a 372 Mg ha⁻¹, la hojarasca varió de 6.56 a 26.43 Mg ha⁻¹, mientras que las raíces fueron de 3.02 a 5.43 Mg ha⁻¹.

Rodríguez-Laguna, Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón, Treviño-Garza y Razo-Zárate (2009) obtuvieron estimaciones de carbono almacenado en un bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México, con ayuda de ecuaciones volumétricas. Se estimó que el total fue de 110.01 Mg C ha⁻¹, distribuidos de la siguiente manera: 82.91 Mg C ha⁻¹ (75.3%) en fustes, ramas y hojas, 16.51 Mg C ha⁻¹ (15%) en raíces, 9.88 Mg C ha⁻¹ (9%) en hojarasca, 0.40 Mg C ha⁻¹ (0.4%) en renuevos y 0.31 Mg C ha⁻¹ (0.3%) en necromasa.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, se han realizado investigaciones sobre las reservas de carbono en los bosques de México, sin embargo, no existe una estimación del carbono almacenado en el PNCM, por lo que al realizarlo se obtendrán resultados que les servirán a los encargados del parque para la venta de bonos voluntarios de carbono. Los bonos de carbono, también llamados bonos verdes, son una forma de movilizar los recursos financieros hacia inversiones limpias y sustentables (Gianfrante & Peri, 2019).

La forma más confiable de estimar carbono almacenado en un árbol es mediante su derribo y peso, sin embargo, el área de estudio se encuentra en una ANP por lo que esta práctica no está permitida y sus costos son elevados. Es por esto por lo que se decidió realizar una comparación entre ecuaciones alométricas y de volumen, ambas aplicadas para la estimación de biomasa.

HIPÓTESIS

- Las estimaciones de biomasa aérea utilizando ecuaciones alométricas y volumétricas presentan diferencias estadísticas significativas.
- Existen diferencias estadísticas significativas en el contenido de carbono de los diferentes tipos de vegetación.

OBJETIVOS DEL TRABAJO

Objetivo general

Evaluar el contenido de carbono en diferentes tipos de vegetación en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey.

Objetivos específicos

- Determinar el número de individuos por categorías diamétricas.
- Evaluar dominancia, densidad, frecuencia e índice de valor de importancia.
- Estimar la biomasa aérea arbórea mediante ecuaciones alométricas.
- Estimar la biomasa aérea arbórea mediante volumen.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en los bosques templados del PNCM ubicado en la región oeste-centro del estado de Nuevo León. El PNCM tiene una extensión total de 177,396.48 ha, de las cuales 1,583.78 ha son de bosque de oyamel, 23,185.13 ha de bosque encino, 13,707.10 ha bosque encino-pino, 15,064.76 ha de bosque pino y 23,068.30 ha de bosque pino-encino (Jiménez et al., 2013). Estos bosques presentan climas semicálido y templado subhúmedo (García, E-CONABIO, 1998) con altitudes que varían de los 600 a los 3200 msnm (CONABIO, 1998). La temperatura media anual va desde los 8 a 22 °C y con precipitación anual de 300 hasta 1000 mm (Cuervo-Robayo et al., 2014a, 2014b). Se seleccionaron los cuatro tipos de vegetación con mayor superficie dentro del Parque Nacional Cumbres de Monterrey: bosque pino, bosque pino-encino, bosque encino-pino y bosque encino (Figura 3).

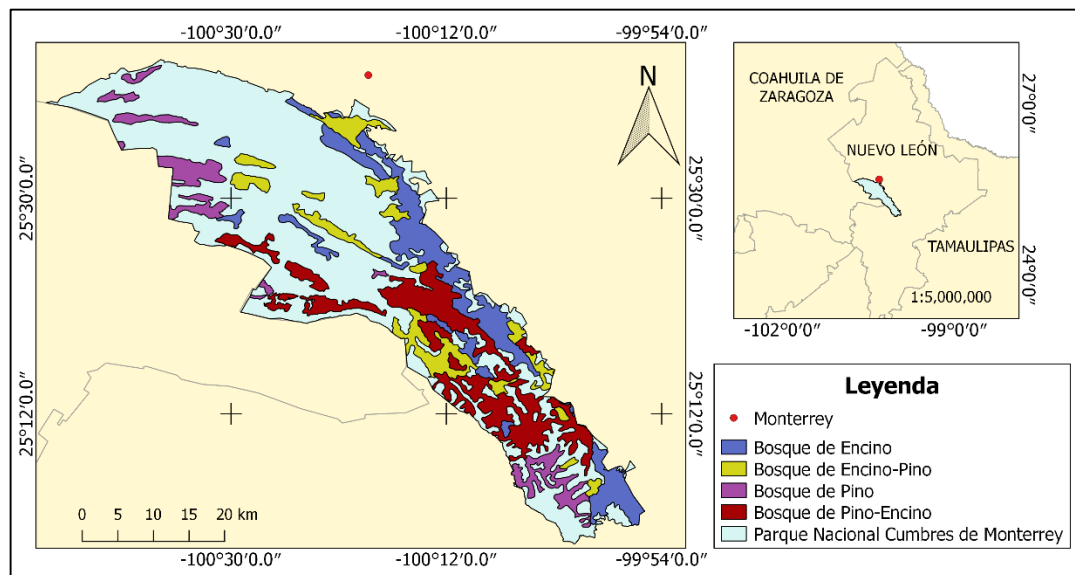


Figura 3. Localización geográfica de los tipos de vegetación.

Los bosques de encino, encino-pino y pino-encino se encuentran dentro de los municipios de Allende, Montemorelos, Monterrey, Rayones, Santa Catarina, Santiago y San Pedro Garza García, a diferencia del bosque de pino, que solamente se encuentra en los municipios de Montemorelos, Rayones, Santa Catarina y Santiago.

El bosque de encino es característico de las zonas montañosas de México, y se estima que existan 150 especies de *Quercus* (posiblemente cerca de 200) en el país. En el estado de Nuevo León los encinos más comunes son *Q. clivicola*, *Q. canbyi* y *Q. porphyrogenita*, y los más frecuentes en las áreas protegidas son *Q. polymorpha* y *Q. rysophylla* (Rzedowski, 2006). Este es el bosque templado con una mayor superficie del PNCM, abarcando el 13.07 %, siendo el tipo de vegetación que almacena mayor C en el ANP con 1,126,797 Mg C (Jiménez et al., 2013).

En México, el género *Pinus* tiene una distribución geográfica restringida, en donde casi todas las especies se comportan de forma dominante o codominante en el ecosistema (Rzedowski, 2006). Existen 41 especies de pinos en el país, que representan el 42% de las especies en el mundo, de las cuales 15 especies se encuentran en el estado de Nuevo León. En el PNCM se tiene referencia de presencia de *P. teocote*, *P. pseudostrobus*, *P. ponderosa*, *P. pinceana*, *P. patula*, *P. montezumae*, *P. hartwegii*, *P. greggii*, *P. cembroides* (Estrada-Castillo, Villarreal-Quintanilla, Salinas-Rodríguez, Cantú-Ayala, González-Rodríguez y Jiménez-Pérez, 2014). El bosque de pino representa el 8.5% de la superficie del PNCM (Jiménez et al, 2013).

Las especies de coníferas tienen una asociación especial con las especies del género *Quercus*, esto da lugar a bosques de encino-pino o pino-encino, que también son llamados bosques mixtos (Estrada-Castillo et al., 2014). El Bosque de pino-encino es el segundo bosque con mayor territorio abarcando el 13% del PNCM, mientras que el bosque de encino-pino representa el 7.7%, siendo el de menor extensión (Jiménez et al., 2013).

Tamaño de muestra

Se realizaron 10 sitios de muestreo por tipo de vegetación dentro del PNCM, la distribución fue aleatoria simple.

Diseño de la unidad muestral

Los sitios de muestreo se basaron en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) propuesto por CONAFOR (2009). El área de los sitios fue de 400 m² (radio= 11.28 m) en donde se midieron los árboles con diámetro mayor o igual a 7.5 cm. Las variables dasométricas tomadas en campo para la caracterización de este estrato fueron: diámetro normal a 1.3 m, diámetros de copa y altura total.

Parámetros ecológicos

Índice de Valor de Importancia (IVI). Se estimó el IVI de cada especie por tipo vegetación de la siguiente manera:

$$IVI = (\text{Dominancia relativa} + \text{Densidad relativa} + \text{Frecuencia relativa}) / 3$$

$$\text{Dominancia relativa} = (\text{Dominancia absoluta por especie}) / (\text{Dominancia absoluta de todas las especies}) \times 100$$

$$\text{donde: Dominancia absoluta} = (\text{Área basal de una especie}) / (\text{Área muestreada})$$

$$\text{Densidad relativa} = (\text{Densidad absoluta por cada especie}) / (\text{Densidad absoluta de todas las especies}) \times 100$$

$$\text{donde: Densidad absoluta} = (\text{Número de individuos de una especie}) / (\text{Área muestreada})$$

$$\text{Frecuencia relativa} = (\text{Frecuencia absoluta por cada especie}) / (\text{Frecuencia absoluta de todas las especies}) \times 100$$

$$\text{donde: Frecuencia absoluta} = (\text{Número de sitios en los que se presenta cada especie}) / (\text{Número total de sitios muestreados})$$

Biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas

Una forma de estimar la biomasa aérea es utilizando ecuaciones alométricas. A partir de las características de los diferentes tipos de vegetación y las especies, se seleccionaron ecuaciones alométricas específicas para evaluar la biomasa aérea, la variable utilizada fue diámetro (Tabla 5).

Tabla 5. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa área.

Especie	Ecuación	Referencia
<i>Abies vejarii</i>	$b = 0.0713 \cdot d^{2.5104}$	Avendaño et al., 2009
<i>Arbutus xalapensis</i>	$b = 0.3764 \cdot d^2 - 2.3146 \cdot d - 1.9106$	Aguilar-Hernández et al., 2016
<i>Colubrina greggii</i>	$\ln(b) = -2.2118 + 2.4133 \cdot \ln(d)$	Chojnacky, Heath & Jenkins, 2013
<i>Cercis canadensis</i>	$\ln(b) = -2.5095 + 2.6175 \cdot \ln(d)$	
<i>Juglans mollis</i>	$\ln(b) = -2.5095 + 2.6175 \cdot \ln(d)$	
<i>Juniperus monosperma</i>	$\log(b) = 1.157 + 2.086 \cdot \log(d)$	Grier et al., 1992
<i>Pinus cembroides</i>	$\ln(b) = 5.078 - 3.764 \cdot \ln(d) + 1.284 \cdot \ln(d)^2$	Marroquín-Morales et al., 2018
<i>Pinus pseudostrobus</i>	$b = 0.35179 \cdot d^2$	Aguirre-Calderón & Jiménez-Pérez, 2011
<i>Pinus teocote</i>	$b = 0.40196 \cdot d^2$	
<i>Quercus spp</i>	$b = 0.45534 \cdot d^2$	

b = biomasa aérea; d = diámetro normal (cm).

Estimación de biomasa aérea desde el volumen

Otra forma de estimar la biomasa aérea es a partir de estimaciones de volumen:

$$b = v \cdot dm \cdot F_{exp}$$

donde: b = biomasa aérea; v = volumen del árbol; dm = densidad de la madera
 F_{exp} = factor de expansión (sin dimensión), relación entre la biomasa total y la biomasa de fuste.

$$v = (\pi/4) \cdot d^2 \cdot h \cdot f$$

donde: v = volumen del árbol; d = diámetro a la altura de pecho (1.30 m); h = altura del árbol; f = factor de forma.

Para obtener el contenido de carbono a partir de la biomasa aérea se utilizó la concentración de carbono por especie según lo reportado en la literatura (Tabla 6).

Tabla 6. Concentración de carbono para las especies del estudio.

Especie	CC	Referencia
<i>Abies vejarii</i>	47.35	Yerena, Jiménez, Aguirre, Treviño y Alanís, 2012.
<i>Juniperus monosperma</i>	49.11	
<i>Pinus cembroides</i>	50.25	
<i>Pinus pseudostrobus</i>	50.35	
<i>Pinus teocote</i>	47.48	Jiménez-Pérez, Aguirre-Calderón, Alanís-Rodríguez e Yerena-Yamallel, 2013.
<i>Arbutus xalapensis</i>	51.17	
<i>Quercus canbyi</i>	49.14	
<i>Quercus laceyi</i>	48.18	
<i>Quercus rysophylla</i>	47.98	

CC= concentración de carbono

Se realizó una prueba t-Student para determinar si existen diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) entre los resultados del contenido de carbono estimado con ecuaciones alométricas y con la ecuación de volumen por el tipo de vegetación.

Para determinar si existen diferencias entre los tipos de vegetación, los resultados de contenido de carbono se sometieron a un análisis de varianza (ANDEVA, con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$) para determinar si existen efectos significativos, y cuando resulte significancia en la prueba, se procedió a realizar un análisis de comparación de medias a través de la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS

Características estructurales

El número de individuos por categorías diamétricas en el bosque de encino se muestra en la figura 4. En el bosque de encino se registró un total de 695 individuos/ha, el 24.5% de los cuales se encuentra en la categoría 10, el 20.1% en la categoría 15 y el 18.7 % en la categoría 20, resultando un 63.3% de los individuos en las primeras categorías.

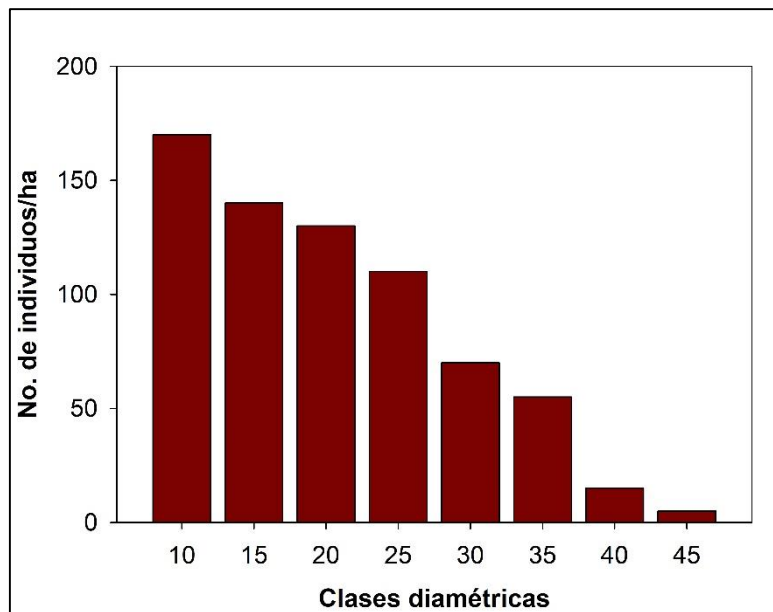


Figura 4. Número de individuos por clases diamétricas en el bosque de encino.

En el bosque de encino-pino se contabilizó un total de 725 individuos/ha, de los cuales el 31.0% se encuentra en la categoría 10, el 27.0% en la categoría 15 y el 17.2% en la categoría 20, dando un 75.3% en las primeras tres categorías (figura 5).

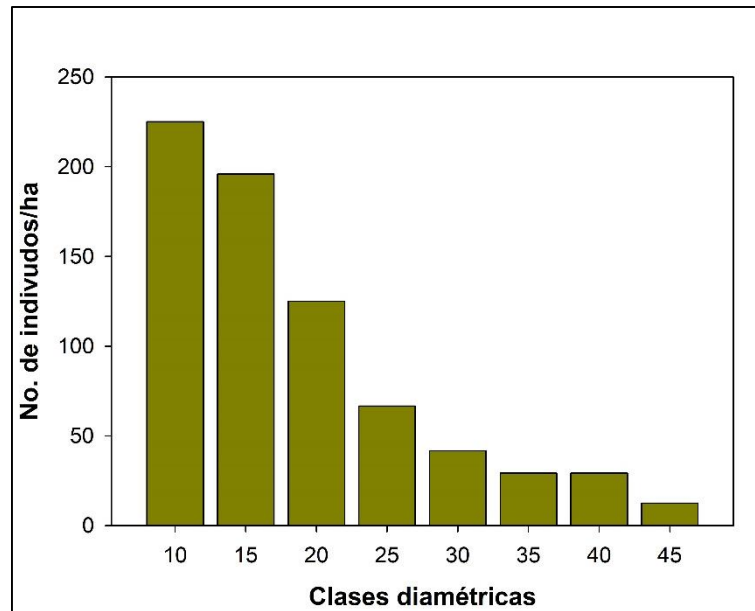


Figura 5. Número de individuos por clases diamétricas en el bosque de encino-pino.

En la figura 6 se muestran los individuos por clases diamétricas del bosque de pino. En este tipo de bosque se registró un 18.6% de los individuos en la categoría 10, un 29.4% en la categoría 15 y un 23.5% en la categoría 20, obteniendo un 71.6% en las primeras categorías. En este tipo de vegetación se presentó un total de 638 individuos/ha.

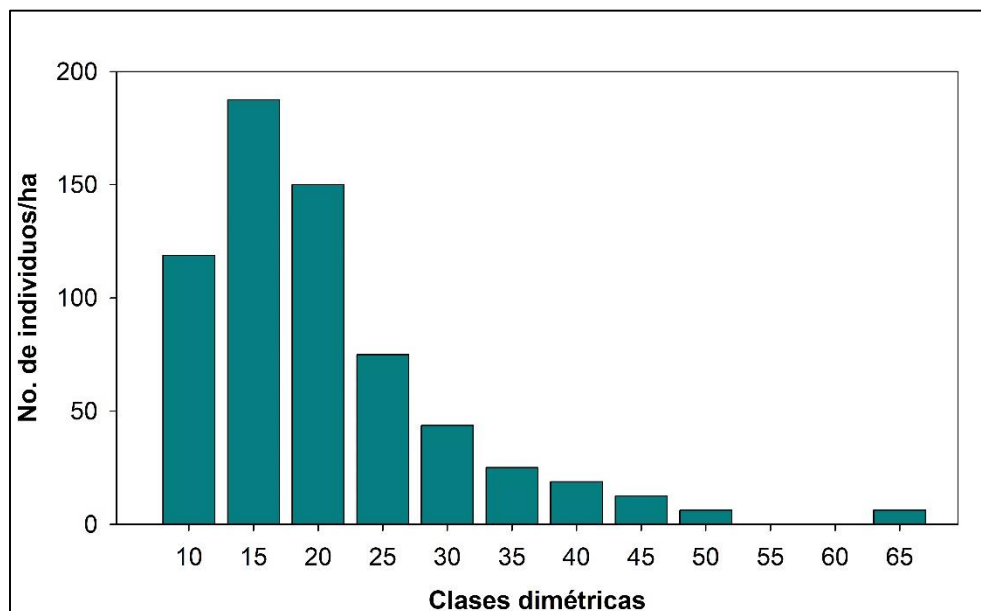


Figura 6. Número de individuos por clases diamétricas en el bosque de pino.

Los individuos por clases dimétricas del bosque de pino-encino se muestran en la figura 7. En este bosque se estimó un total de 683 individuos/ha, el 39.6% de los cuales se presentó en la categoría 10, el 20.7% en la categoría 15 y el 11.0% en la categoría 20%, dando un 76.2%.

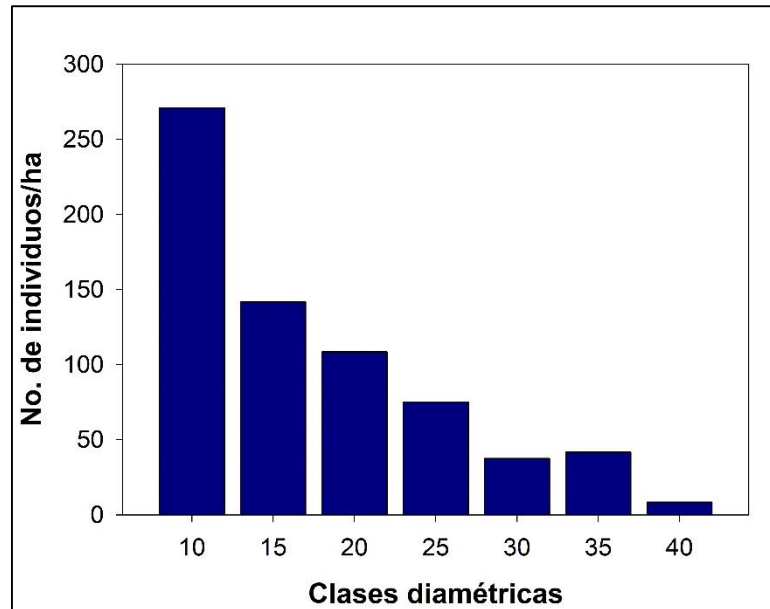


Figura 7. Número de individuos por clases diamétricas en el bosque de pino-encino.

En la tabla 7 se muestran las especies por vegetación con los valores de dominancia relativa, densidad relativa, frecuencia relativa e IVI. Para el bosque de encino las especies con valor más alto de índice de valor de importancia fueron *Quercus polymorpha* (52.3%), *Cercis canadensis* (11.8%), *Quercus canby* (9.8%), *Quercus rysophylla* (8.1%) y *Pinus teocote* (5.8%).

En los sitios de encino-pino las especies con porcentajes mayores fueron *Abies vejarii* (30.6%), *Quercus polymorpha* (18.0%), *Pinus pseudostrobus* (17.5%) *Quercus mexicana* (16.3%) y *Junglas mollis* (7.1%).

En el tipo de vegetación de pino resultaron cinco especies: *Pinus pseudostrobus* (49.9%), *Pinus cembroides* (18.3%), *Quercus laceyi* (17.5%), *Pinus teocote* (11.3%) y *Quercus polymorpha* (3.0%).

Las especies que obtuvieron el IVI más alto en las áreas de pino-encino fueron *Pinus pseudostrobus* (31.5%), *Pinus teocote* (23.9%), *Pinus cembroides* (10.3%), *Quercus rysophylla* (8.9%) y *Quercus laurina* (14.3%).

Tabla 7. Parámetros ecológicos de las especies por tipo de vegetación.

Especie	Dominancia relativa	Densidad relativa	Frecuencia relativa	IVI
Bosque encino				
<i>Quercus polymorpha</i>	63.6	61.9	31.3	52.3
<i>Cercis canadensis</i>	12.1	10.8	12.5	11.8
<i>Quercus canbyi</i>	10.1	12.9	6.3	9.8
<i>Quercus rysophylla</i>	6.9	5.0	12.5	8.1
<i>Pinus teocote</i>	2.8	2.2	12.5	5.8
<i>Juglans mollis</i>	2.2	3.6	6.3	4.0
<i>Quercus intricata</i>	1.4	2.2	6.3	3.3
<i>Arbutus xalapensis</i>	0.6	0.7	6.3	2.5
<i>Colubrina greggii</i>	0.3	0.7	6.3	2.4
Bosque encino-pino				
<i>Abies vejarii</i>	36.9	35.1	20.0	30.6
<i>Quercus polymorpha</i>	15.6	18.4	20.0	18.0
<i>Pinus pseudostrobus</i>	18.7	17.8	16.0	17.5
<i>Quercus mexicana</i>	14.6	14.4	20.0	16.3
<i>Juglans mollis</i>	4.6	4.6	12.0	7.1
<i>Quercus laceyi</i>	6.4	6.3	4.0	5.6
<i>Arbutus xalapensis</i>	2.3	2.9	4.0	3.0
<i>Pinus teocote</i>	0.9	0.6	4.0	1.8
Bosque pino				
<i>Pinus pseudostrobus</i>	57.7	61.2	30.8	49.9
<i>Pinus cembroides</i>	10.7	13.6	30.8	18.3
<i>Quercus laceyi</i>	21.5	15.5	15.4	17.5
<i>Pinus teocote</i>	9.7	8.7	15.4	11.3
<i>Quercus polymorpha</i>	0.5	1.0	7.7	3.0
Bosque pino-encino				
<i>Pinus pseudostrobus</i>	40.7	40.2	13.6	31.5
<i>Pinus teocote</i>	31.3	26.8	13.6	23.9
<i>Pinus cembroides</i>	8.9	12.8	9.1	10.3
<i>Quercus rysophylla</i>	8.5	9.1	9.1	8.9
<i>Quercus laurina</i>	2.7	2.4	9.1	4.8
<i>Quercus laceyi</i>	1.4	1.8	9.1	4.1
<i>Quercus polymorpha</i>	1.9	1.2	9.1	4.1
<i>Juglans mollis</i>	1.2	1.8	4.5	2.5
<i>Arbutus xalapensis</i>	1.1	1.2	4.5	2.3

Especie	Dominancia relativa	Densidad relativa	Frecuencia relativa	IVI
<i>Colubrina greggii</i>	0.6	0.6	4.5	1.9
<i>Quercus canbyi</i>	0.6	0.6	4.5	1.9
<i>Quercus mexicana</i>	0.5	0.6	4.5	1.9
<i>Juniperus monosperma</i>	0.5	0.6	4.5	1.9

El bosque de pino-encino presenta una mayor riqueza de especies en comparación a los otros tipos de vegetación y el bosque de pino menor cantidad. En el bosque de encino-pino la especie con el valor de IVI más alto fue *Abies vejarii*, pero al agruparlos por género *Quercus* es el que obtiene el porcentaje mayor.

Biomasa aérea arbórea

Se estimó la biomasa aérea en el estrato arbóreo a partir de ecuaciones alométricas y ecuaciones de volumen (Figura 8). Con ecuaciones alométricas se obtuvieron valores promedio de 138.00 ± 16.97 Mg/ha para el bosque de encino, 121.52 ± 14.32 Mg/ha para bosque de pino, 117.33 ± 12.42 Mg/ha para el bosque de encino-pino y 93.10 ± 27.94 Mg/ha para el bosque de pino-encino.

A partir de las ecuaciones de volumen se estimó 129.16 ± 17.73 Mg/ha para el bosque de encino-pino, 118.96 ± 31.17 Mg/ha para bosque encino, 113.47 ± 18.76 Mg/ha para bosque de pino-encino y 89.22 ± 19.42 Mg/ha para bosque de pino.

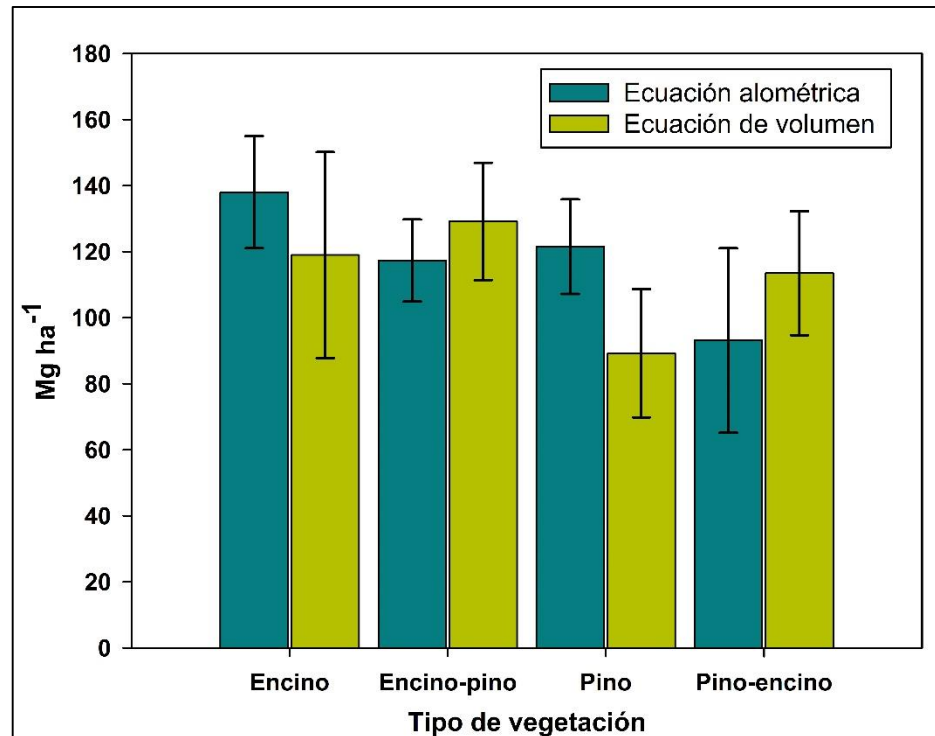


Figura 8. Biomasa aérea en el estrato arbóreo por tipo de vegetación, según el método de estimación.

Contenido de carbono

En figura 9 se muestran gráficamente los resultados de contenido de carbono a partir de la biomasa estimada con ecuaciones alométricas y ecuaciones volumétricas. Para el bosque de encino se calculó un promedio de 67.41 ± 8.26 Mg/ha y 58.15 ± 15.18 Mg/ha, para bosque de encino-pino 57.10 ± 5.60 Mg/ha y 63.00 ± 7.81 Mg/ha, para bosque de pino 59.94 ± 7.36 Mg/ha y 43.96 ± 9.13 Mg/ha y para bosque de pino-encino 45.34 ± 12.83 Mg/ha y 55.38 ± 8.14 , respectivamente.

Comparando las estimaciones de carbono con ecuaciones alométricas y la ecuación de volumen para el bosque de pino se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$), para el bosque de encino, encino-pino y pino-encino no se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) por lo que ambas metodologías resultaron ser confiables en estos tres tipos de vegetación.

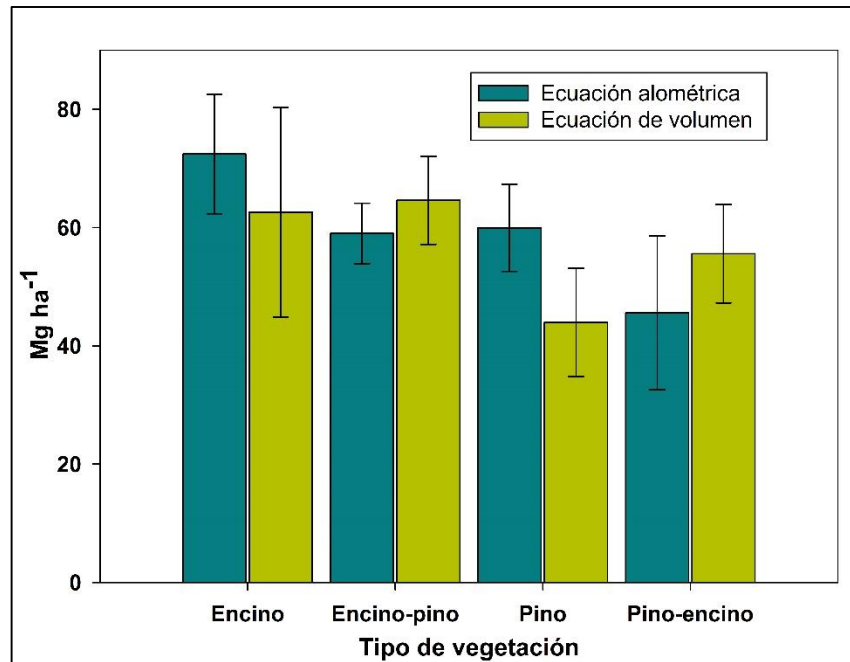


Figura 9. Contenido de carbono en el estrato arbóreo por tipo de vegetación, según el método de estimación.

En la tabla 8 se muestran los resultados de las estimaciones de carbono con la aplicación de ecuaciones alométricas. Al hacer la comparación de medias a través de la prueba de Tukey con una confiabilidad de $\alpha=0.05$ el bosque de pino-encino y el bosque de encino muestran diferencias estadísticas significativas.

Tabla 8. Contenido de carbono por tipo de vegetación.

Tipo de vegetación	Media	SD	Agrupación Tukey
Pino-encino	45.34	12.83	a
Encino-pino	57.10	5.60	ab
Pino	59.92	7.34	ab
Encino	67.41	8.26	b

SD= desviación estándar

La distribución del almacenamiento de carbono por clases diamétricas de los diferentes tipos de vegetación se muestra en la figura 10. Para el bosque de encino las clases que almacenan una mayor cantidad de carbono son la 25, 30 y 35 con 13.9, 12.0 y 13.6 Mg/ha respectivamente, y la clase 45 es la que almacena una menor cantidad de carbono (1.8 Mg/ha). En el bosque de encino-pino y el de pino la clase 20 es la que se estima que almacena mayor cantidad de carbono

con 9.9 y 11.4 Mg/ha. En el bosque de pino-encino las clases 25 y 35 son las que contienen una mayor cantidad de carbono con 9.2 y 9.7 Mg/ha, la clase 40 resulta con el valor inferior (2.4 Mg/ha). La clase 10 almacena menos cantidad de carbono en el bosque de encino-pino y el bosque de pino (3.7 y 2.3 Mg/ha respectivamente), en el bosque de encino y el de pino-encino se encuentra entre las clases diamétricas con menor carbono almacenado (3.4 y 4.2 Mg/ha respectivamente).

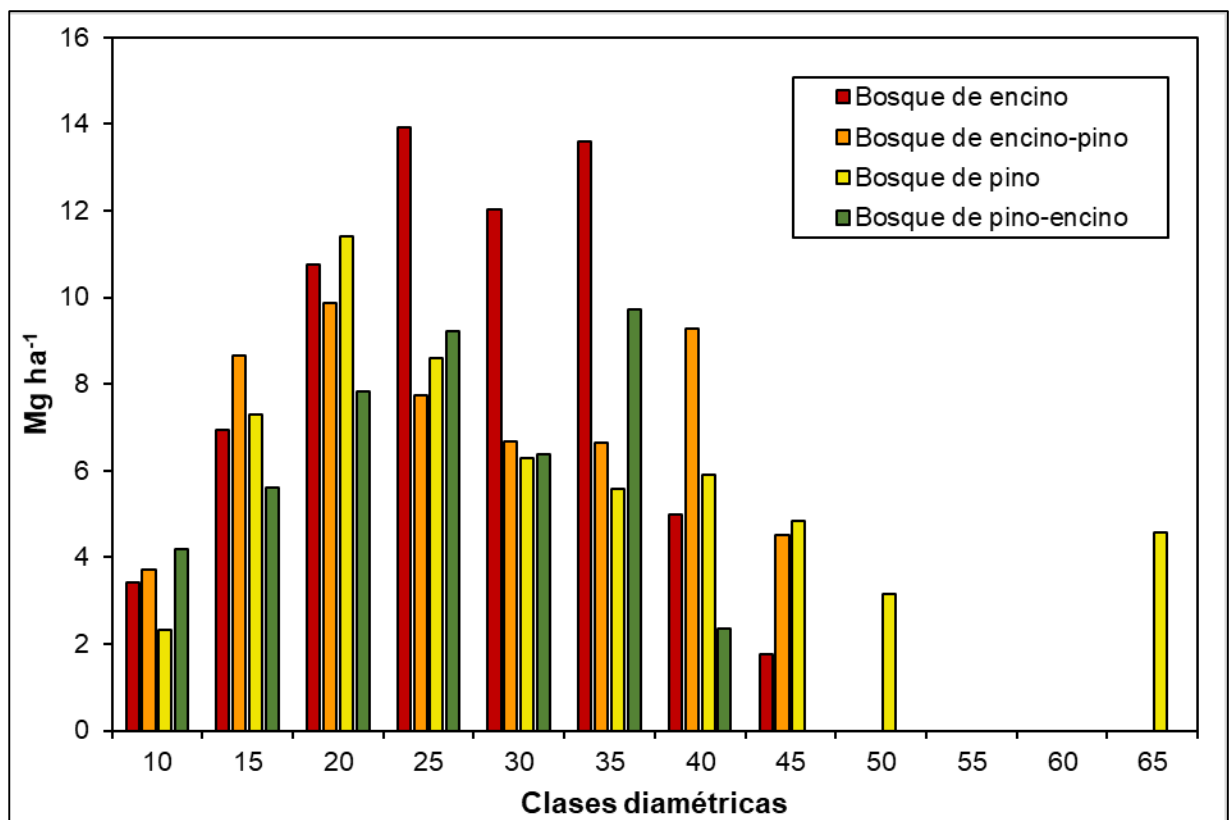


Figura 10. Distribución del carbono almacenado por clases diamétricas.

DISCUSIÓN

Los bosques del PNCM muestran una estructura horizontal similar a lo reportado por Rodríguez et al. (2006) en el bosque de niebla en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, en donde la mayoría de los individuos se presentan en las primeras clases diamétricas mostrando una tendencia de heterogeneidad.

Buendía-Rodríguez, Treviño-Garza, Alanís-Rodríguez, Aguirre-Calderón, González-Tagle y Pompa-García (2019) analizaron diez sitios con asociación de pino-encino, encino-pino y presencia de los géneros *Abies*, *Pseudotsuga* y *Picea* localizados al sur del estado de Nuevo León, reportaron en sitios con mayor altitud (2900 msnm) una cantidad de cuatro especies en comparación a los sitios con menor altitud (2500-2700 msnm) y mayor cantidad de especies, entre 10 y 11 especies, estos resultados difieren en las especies de este estudio, los bosques de pino y de pino-encino localizados en altitudes de hasta 3000 msnm fueron de 5 y 13 especies, los boques de encino y de encino-pino se localizan en altitudes menores (hasta 2600-2800 msnm) resultaron 9 y 8 especies, respectivamente. En todos los sitios reportados por Buendía-Rodríguez et al. (2019) se encontró al menos una especie del género *Pinus* y *Quercus*; *Arbutus xalapensis* se presentó en ocho sitios, *Pinus teocote* en cuatro (con el mayor valor de IVI) y *Pinus ayacahuite* en siete sitios, en comparación a los bosques templados del PNCM, *Arbutus xalapensis* se encontró solamente en los bosques de encino y encino-pino, *Pinus teocote* asumió presencia en los cuatro tipos de vegetación, sin embargo, en ninguno obtuvo el IVI más alto y no se registró el *Pinus ayacahuite*.

Alanís-Rodríguez et al. (2012) estudiaron sitios de un bosque de pino-encino con recurrencia de incendios en el Parque Ecológico Chipinque (perteneciente al PNCM) reportando resultados similares a los de este estudio. En estos sitios se registraron 10 géneros y 14 especies leñosas. El género con mayor presencia fue *Quercus*, con las especies *Quercus canbyi*, *Quercus laeta*, *Quercus laceyi* y *Quercus rysophylla*. En sitios con orientación noroeste se

registró la presencia de ocho especies, de las cuales *Quercus rysophylla* (34.32%), *Quercus canbyi* (22.47%) y *Quercus laceyi* (21.17%) obtuvieron los valores más alto de IVI. En los sitios con orientación noreste resultaron 11 especies, siendo *Quercus rysophylla* (51.93%) y *Quercus laceyi* (15.24%) las especies con valores más altos de IVI.

Garciano-Ávila, Aguirre-Calderón, Alanís-Rodríguez y Lujan-Soto (2017) caracterizaron la estructura y diversidad de especies arbóreas en bosques de pino-encino localizado al noroeste de México, obtuvieron resultados diferentes a los de este estudio. El género *Pinus* fue el más abundante y dominante (69.01% y 70.8%) seguido por *Quercus* (18.78% y 23.71%). Los géneros más frecuentes fueron *Pinus* (30.00%) y *Juniperus* (26.67%). Las especies con los valores de IVI más altos fueron *Pinus cooperi* (23.36%), *Pinus durangensis* (23.63%) y *Quercus sideroxyla* (15.51%). En el bosque de pino-encino del PNCM el género *Pinus* fue el más abundante y dominante (80.9 y 79.9 %), seguido por *Quercus* (15.7 y 15.9 %) a diferencia de la frecuencia, el género *Quercus* obtuvo el valor más alto (45.5%) seguido por *Pinus* (36.4%). Las especies reportadas con valores de IVI más altos por Garciano et al. (2017) no se registraron en los bosques templados del PNCM.

Los valores obtenidos de biomasa aérea en este estudio son similares a los reportados en la literatura. En los bosques templados en Cofre de Perote, Veracruz, se citan valores de biomasa aérea de 73.63 a 372 Mg/ha con la aplicación de ecuaciones alométricas (Mendoza-Ponce & Galicia, 2010). Existen estimaciones de biomasa en bosques del sur de Nuevo León que van de 5.54 a 119 Mg C ha⁻¹ en bosque de pino, entre 13.34 a 99.24 Mg C ha⁻¹ para bosque de encino-pino y 7.78 a 79.11 Mg C ha⁻¹ para bosque de pino-encino (Domínguez-Cabrera et al., 2009). Návar-Cháidez (2010) menciona un valor para bosques del estado de Nuevo León de 74.16 ± Mg ha⁻¹.

Aguirre-Calderón y Jiménez-Pérez (2011) citan valores similares de contenido de carbono para bosques de pino-encino de 45.24 Mg/ha y de encino-

pino de 64.20 Mg/ha en los bosques del sur de Nuevo León. Galeana et al. (2013) estimaron un contenido de carbono en bosques irregulares de 6.25 a 362.20 Mg C ha⁻¹. En bosque de pino-encino en la Reserva de la biosfera El Cielo, Tamaulipas, reportan 82.91 Mg C/ha (Rodríguez et al., 2009).

A pesar de que, para los tipos de vegetación de encino, encino-pino y pino-encino no se presentaron diferencias estadísticas significativas ($P > 0.05$) en las estimaciones de carbono con ecuaciones alométricas y la ecuación de volumen, se recomienda utilizar ecuaciones alométricas si se cuenta con ellas, ya que estos valores pueden ser subestimados o sobreestimados. Para el bosque de encino y pino se sobrestimó 9.27 y 15.96 Mg/ha respectivamente, para el bosque de encino-pino y pino-encino se subestimó entre 5.90 y 10.04 Mg/ha, y al extrapolarlo a áreas extensas se estarían sobrestimando y subestimando cantidades importantes.

Entre los diferentes tipos de vegetación existen diferencias ($P < 0.05$) en el contenido de carbono, al aplicar la prueba Tukey mediante la comparación de medias con una confiabilidad de $\alpha = 0.05$, el bosque de pino-encino y el bosque de encino presentan diferencias estadísticas en la estimación de carbono.

El potencial de almacenamiento de carbono en un bosque depende de la composición de especies, estructura, clases diamétricas y características físicas del ecosistema (Pardos, 2010). En los cuatro tipos de vegetación la mayoría de los individuos se encontraron en las primeras clases dimétricas, dando la J invertida, sin embargo, esto no significa que en estas clases dimétricas se almacene la mayor cantidad de carbono. Yepes et al. (2016) reportaron que la biomasa aérea se encuentra principalmente en los árboles con diámetros grandes. En el bosque de encino es en la clase diamétrica 10 donde se encuentra el mayor número de individuos (170 individuos/ha), no obstante, se estima que solamente almacena 3.4 Mg/ha, en comparación con las clases 25 y 35 que almacenan 13.9 y 13.6 Mg/ha con 110 y 55 individuos/ha respectivamente, o con la clase diamétrica 45, que únicamente tiene presencia de 5 individuos/ha pero se estima que almacena 1.8 Mg/ha.

En el bosque de pino en la clase diamétrica 15 se encuentra la mayor densidad de árboles, con 188 individuos/ha, almacenando un promedio de 7.3 Mg/ha. La clase diamétrica 20 es la que se estima que tiene el mayor contenido de carbono, con 11.4 Mg/ha en 150 individuos/ha. En las clases 50 y 65 solamente se encontraron 6 individuos/ha almacenando 3.2 y 4.6 Mg/ha, respectivamente.

En los bosques mixtos, en comparación de los bosques puros, se registró un mayor número de árboles en la clase diamétrica 10 con 271 y 225 individuos/ha pero solo almacenan un estimado de 4.2 y 3.7 Mg/ha. En el bosque de encino-pino la clase con mayor contenido de carbono fue la 20, con 9.9 Mg/ha y una densidad de 125 individuos/ha. Sin embargo, la clase diamétrica 40 almacena 9.3 Mg/ha y se estima que se encuentren en esta categoría 29 individuos/ha. En el bosque de pino-encino el mayor contenido de carbono almacenado se presentó en la categoría 35, con 9.7 Mg/ha y 42 individuos/ha.

En bosques con densidad de árboles altas puede provocar estrés hídrico y esto se encuentra relacionado con una disminución de la productividad (Candel-Pérez et al., 2017). Los bosques de encino-pino presenta una densidad mayor en comparación al bosque de encino, de igual manera el bosque de pino-encino y el bosque de pino, por lo que existe una mayor competencia por los recursos en los bosques mixtos dando como resultado un menor almacenamiento de carbono. Los bosques mixtos bajo un manejo adecuado podrían proporcionar estrategias de adaptación ante el cambio climático (González de Andrés et al., 2018).

CONCLUSIONES

La estructura que presentan los bosques del Parque Nacional Cumbres de Monterrey es J invertida, en donde la mayoría de los individuos están en las primeras clases diamétricas, distintivo de un bosque disetáneo.

El bosque de pino es el que resultó con una menor riqueza de especies, seguido por los tipos de vegetación de encino-pino y encino, mientras que el bosque de pino-encino es el de mayor cantidad de especies.

Para el bosque de pino existen diferencias estadísticas significativas en las estimaciones de biomasa aérea utilizando ecuaciones alométricas y de volumen, por lo que la primera hipótesis se acepta para este tipo de vegetación. Sin embargo, para el bosque encino, encino-pino y pino-encino no se encontraron diferencias estadísticas significativas, por lo que ambas metodologías son confiables, aunque se recomienda usar ecuaciones alométricas si se cuenta con ellas, ya que al hacer las comparaciones de estimación de carbono se presentan sobrestimaciones o subestimaciones.

Comparando las medias del contenido de carbono por tipo de vegetación, existen diferencias estadísticas entre el bosque de pino-encino y el de encino, por lo que la segunda hipótesis se acepta.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Hernández, L., García-Martínez, R., Gómez-Miraflor, A., Martínez-Gómez, O. (2016). Estimación de biomasa mediante la generación de una ecuación alométrica para madroño (*Arbutus xalapensis*). In *IV Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas*. 529-530.
- Aguilar-Rodríguez, S., Abundiz-Bonilla, L., & Barajas-Morales, J. (2001). Comparación de la gravedad específica y características anatómicas de la madera de dos comunidades vegetales en México. *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 72 (2), 171-185.
- Aguirre-Calderón, O.A., & Jiménez-Pérez, J. (2011). Evaluación del contenido de carbono en bosques del Sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(6), 73-83.
- Aguirre-Salado, C. A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., de los Santos-Posadas, H. M., Haapanen, R., & Aguirre-Salado, A. I. (2009). Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino Patula en Hidalgo, México. *Agrociencia*, 43(2), 209-220. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000200011&lng=es&tlng=es
- Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Valdecantos-Dema, A., González-Tagle, M., Aguirre-Calderón, O. & Treviño-Garza, E. (2012). Composición y diversidad de la regeneración natural en comunidades de *Pinus-Quercus* sometidas a una alta recurrencia de incendios en el noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83, 1208-1214. doi: 10.7550/rmb.29708.
- Allen, M.R., Dube, O.P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., ... & Zickfeld, K. (2018). Framing and Context. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (Eds.). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above*

pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. (pp. 49-91).

- Alvis, G. J. (2009). Análisis estructural de un bosque natural localizado en zona rural del municipio de Popayan. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 7(1), 115-122.
- Avendaño-Hernández, D.M., Acosta-Mireles, M., Carillo-Anzures, F., & Etchevers-Barra, J.D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32 (3), 233-238.
- Birdsey, R., Pan, Y., & Houghton, R. (2013). Sustainable land scapes in a world of change: Tropical forests, land use and implementation of REDD+: Part I. *Carbon Management*, 4(5), 465-468. doi: 10.4155/CMT.13.53
- Bruhwiller, L., Michalak, A. M., Birdsey, R., Fisher, J. B., Houghton, R. A., Huntzinger, D. N., & Miller, J. B. (2018). Chapter 1: Overview of the global carbon cycle. In N. Cavallaro, G. Shrestha, R. Birdsey, M. A. Mayes, R. G. Najjar, S. C. Reed, P. Romero-Lankao, and Z. Zhu (Eds.), *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report* U.S. Global Change Research Program, (pp. 42-70), Washington, DC, USA. doi: 10.7930/SOCCR2.2018.Ch1.
- Buendía-Rodríguez, E., Treviño-Garza, E., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O., González-Tagle, M. & Pompa-García, M. (2019). Estructura de un ecosistema forestal y su relación con el contenido de carbono en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 10(54), 4-25.
- Candel-Pérez, D., Blanco, J.A., González de Andrés, E., Lo, Y.-H., Imbert, J.B. & Castillo, F. (2017). Simulando la interacción entre la densidad inicial y los flujos de agua y nutrientes para comprender el desarrollo de rodales mixtos de *Pinus sylvestris* y *Fagus sylvatica* bajo cambio climático. *Ecosistemas*, 26(2): 38-51. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-2.05
- Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covalada-Ocon, S., & Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias:

- primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24(spe, e2401894), 1-22. doi: 10.21829/myb.2018.2401894
- Chojnacky, D. C., Heath, L. S., & Jenkins, J.C. (2013). Updated generalized biomass equations for North American tres pecies. *Forestry*, 87, 129–151. doi: 10.1093/forestry/cpt053
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J. N., ... & Thornton, P. (2013). Carbon and other biogeochemical cycles. In T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (Eds.) *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp 465-570). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, US.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2006). Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Programa de Conservación y Manejo.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2009). *El Inventario Nacional Forestal y de Suelos de México 2004-2009. Una herramienta que da certeza a la planeación, evaluación y el desarrollo forestal de México*. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2011). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Manual y procedimientos para el muestreo de campo (RE-MUESTREO 2011)*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2012). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe 2004-2009* (1a ed.). Zapopan, Jalisco, México: Autor.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2015). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Procedimientos de muestreo*. Guadalajara, Jalisco., México: Autor.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2018). *El Inventario Nacional Forestal y de Suelos de México. Informa de Resultados 2009-2014* (1a ed.). México: Autor.

- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (2012). Áreas Protegidas en México. Consultado 15-03-2018 en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/region/areasprot/enmexico.html>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). Curvas de nivel para la República Mexicana, escala 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Corominas, J. (2014). Los primeros minutos del efecto invernadero. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 11 (1), 100-107.
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). Temperatura media anual en México (1910-2009), escala 1:1 000 000. Modificado por CONABIO (2015). México, D.F.
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). Precipitación anual en México (1910-2009), escala 1:1 000 000. Modificado por CONABIO (2015). México, D.F.
- Curtis, J. T., & McIntosh, R. P. (1951). An upland forest continuum in the pariré-forest border region of Wisconsin. *Ecology*, 32, 476-496. doi: 10.2307/1931725
- Cutini, A., Chianucci, F., & Manetti, M.C. (2013). Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *IForest-Biogeosciences and Forestry*, 6 (6), 331-337. doi: 10.3832/ifor0941-006
- De la Paz Pérez-Olvera, Carmen, & Dávalos-Sotelo, Raymundo. (2008). Algunas características anatómicas y tecnológicas de la madera de 24 especies de *Quercus* (encinos) de México. *Madera y bosques*, 14(3), 43-80.
- Diéguez-Aranda, U., Rojo-Alboreca, A., Casteo-Dorado, F., Álvarez-González, J.G., Barrio-Anta, M., Crecente-Campo, F., ...Sánchez-Rodríguez, F. (2009). *Herramientas silvícolas para la gestión forestal sostenible de Galicia*. Lugo,

- Galicia, España: Dirección Xeral de Montes, Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia.
- DOF (DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN). (2018). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente. México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Domínguez-Cabrera, G., Aguirre-Calderón, O.A., Jiménez-Pérez, J., Rodríguez-Laguna, R., & Díaz-Balderas, J.A. (2009). Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), 59-64.
- Escobar, E., & Maass, M. (2008). Diversidad de procesos funcionales en los ecosistemas. In Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad (pp. 161-189). México: CONABIO.
- Estrada-Castillo, A., Villarreal-Quintanilla, J., Salinas-Rodríguez, M., Cantú-Ayala, C., González-Rodríguez, H. y Jiménez-Pérez, J. (2014). *Coníferas de Nuevo León, México (1era. Edición)*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Fonseca-González, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci)*, 51(2), 91-109. doi: 10.15359/rca.51-2.5.
- Forero-Cantor, G.A., Saldarriaga-Muñoz, J.P., & Vargas-Romero, M. (2017). Cambio climático: impactos y perspectivas de investigación desde una visión multidisciplinar. *Tendencias*, 18(2), 122-138. doi: 10.22267/rtend.171802.80
- Gaioli, M., & Blazquez, A. (2016). Impacto del cambio climático en la salud. *Medicina Infantil*, XXIII(1), 54-59. Obtenido de <http://www.medicinainfantil.org.ar/>.
- Galeana-Pizaña, J.M., Ordóñez-Díaz, J.A.B., & Corona-Romero, N. (2013). Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera y Bosques*, 19(1), 53-69.

- García, E. (1998). Climas, escala 1:1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- García-Espinoza, G. G., Garcia-Magaña, J. J., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J., García-Cuevas, X., & Hernández-Ramos, A. (2016). Precisión de los coeficientes y cocientes de forma en la estimación del volumen de *Pinus montezumae* Lamb. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 19-36.
- Garciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, O., Alanís-Rodríguez, E. & Lujan-Soto, J. (2017). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 4(12), 535-542. Doi: 10.19136/era.a4n12.1114
- Gianfrante, G., & Peri, M. (2019). The green advantage: Exploring the convenience of issuing green bonds. *Journal of Cleaner Production*, 219, 127-135. doi:10.1016/j.jclepro.2019.02.022
- Gómez-Romero, M., & Linding-Cisneros, R. (2016). Restauración de elementos de bosque templado en sitios severamente erosionados de Michoacán. In E. Ceccon, & C. Martínez-Garza (Eds.). *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas* (1era ed., pp. 179-199). Cuernavaca, Morelos, México: CRIM-UNAM, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, CONABIO.
- González de Andrés, E., Camarero, J., Blanco, J., Bosco-Imbert, J., Lo, Y-H., Sangüesa-Barreda, G. & Castillo, F. (2018). Tree-to-tree competition in mixed European beech-Scots pine forests has different impacts on growth and water-use efficiency depending on site conditions. *Journal of Ecology*, 106(1), 59-75. Doi: 10.1111/1365-2745.12813.
- Granados-Sánchez, D., López-Ríos, G., & Hernández-García, M. (2007). Ecología y silvicultura en bosques templados. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 3 (1), 67-83.
- Grier, C.C., Elliott, K.J. & McCullough, D.G. (1992). Biomass distribution and productivity of *Pinus edulis*—*Juniperus monosperma* woodlands of north-central Arizona.

Forest Ecology and Management, 50 (3-4). 331-350. doi: 10.1016/0378-1127(92)90346-B

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Summary for Policymakers. In T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P.M. Midgley (Eds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3–29). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, US
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). cambio climático 2014: informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático IPCC, Ginebra, Suiza: R.K. Pachauri & L.A. Meyer (Eds.).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (Eds.).
- Jiménez, J., Aguirre, O., & Kramer, H. (2001). Análisis de la estructura horizontal y vertical en un ecosistema multicohortal de pino-encino en el norte de México. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 10 (2), 355-366.
- Jiménez, J., Aguirre, O., Alanís, E., & Yerena, J.I. (2013). Contenido de Carbono en Especies Vegetales. In: Cantú-Ayala et al. (Eds.), *Historia Natural del Parque Nacional Cumbres de Monterrey, México*. UANL-CONANP. México, pp. 349-355.

- Jiménez, J., Treviño, E.J., & Yerena, J.I. (2013). Concentración de carbono en especies del bosque de pino-encino en la Sierra Madre Oriental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(17), 50-61.
- Jiménez-Sierra, C., Sosa-Ramírez, J., Cortés-Calva, P., Solís-Cámara, A. B., Íñiguez-Dávalos, L., & Ortega-Rubio, A. (2014). México país megadiverso y la relevancia de las áreas naturales protegidas. *Investigación y Ciencia*, 22 (60), 16-22.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., Pongratz, J., ... Zheng, B. (2018). Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data*, 10, 2141–2194. doi: 10.5194/essd-10-2141-2018
- López-Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Monarrez-Gonzalez, J. C., González-Tagle, M. A., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Composition and diversity of forest species in forests temperate of Puebla, Mexico. *Madera y bosques*, 23(1), 39-51. doi: 10.21829/myb.2017.2311518
- Lozada-Dávila, J. R. (2010). Consideraciones metodológicas sobre los estudios de comunidades forestales. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 77-88. Obtenido de http://www.ula.ve/ciencias-forestales-ambientales/indefor/wp-content/uploads/sites/9/2017/01/2010_ConsMetEstComVeg_orig.pdf
- Marcos-Robles, J.L., Gil-Docampo, M.L., Ortiz-Sanz, J., Martínez-Rodríguez, S., Garrido-Launaga, F., Sánchez-Sastre, L.F., Hernández-Navarro, S., ... & Ortiz-Sanz, L. (2016). Determinación de biomasa en parcelas de cultivos herbáceos mediante cámaras ópticas elevadas por medio de vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Investigación Cualitativa en Ingeniería y Tecnología*, 4, 95-103.
- Marroquín-Morales, P., Méndez-González, J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, A., & Yerena-Yamallel, J.I. (2018). Estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill. en Saltillo, Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9 (47) 94-110. doi: 10.29298/rmcf.v9i47.172

- Mendoza-Ponce, A., & Galicia, L. (2010). Aboveground and belowground biomass and carbon pools in high land temperate forest lands cape in Central Mexico. *Forestry*, 83(5), 497-506. doi:10.1093/forestry/cpq032
- Montoya, J. C., Méndez, J., Sosa, L., Ruíz, C. G., Zermeño, A., Nájera-Luna, J. A., Manzano, M. G., & Velázquez, A. S. (2018). Ecuaciones de biomasa aérea y volumen para *Pinus halepensis* Mill., en Coahuila, México. *Madera y Bosques*, 24 (Núm. esp.) e2401880, 1-11. doi: 10.21829/myb.2018.2401880.
- Nabuurs, G. J., Ravindranath, N.H., Paustian, K., Freibauer, A., Hohenstein, W., & Makundi, W. (2003). LUCF sector good practice guidance. In. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Hayama, Kanagawa, Japón.
- Návar-Cháidez, J.J. (2010). Los bosques templados del estado de Nuevo León: el manejo sustentable para bienes y servicios ambientales. *Madera y Bosques*, 16(1), 51-69 51.
- Nordht, N.E., & Verwijst, T. (2004). Above-ground biomass assessments and first cutting cycle production in willow (*Salix sp.*) coppice—a comparison between destructive and non-destructive methods. *Biomass and Bioenergy*, 27, 1-8.
- Olvera-Vargas, M., & Figueroa-Rangel, B.L. (2012). Caracterización estructural de bosques montanos dominados por encino en el centro-occidente de México. *Ecosistemas*, 21(1-2), 74-84.
- Ordóñez-Díaz, J.A., Galicia-Naranjo, A., Venegas-Mancera, N.J., Hernández-Tejada, T., Ordóñez-Díaz, M.J., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques*, 21(77-126), 77-126.
- Orzoco, L., & Brumér, C. (2002). *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central*. Turrialba, Costa Rica. Centro Agrónomo Tropical de Investigación y Enseñanzas.

- Pardos, J. (2010). *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*. Madrid, España. INIA.
- Paz-Pallet, F., Romero-Benítez, V., Argumedo-Espinoza, J.A., Bolaños-González, M., de Jong, B., de la Cruz-Cabrera, C., & Velázquez-Rodríguez, A. (2019). Capítulo 23 Dinámica de uso de suelo y vegetación. In: F. Paz-Pellat, J.M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos & A.S. Velázquez-Rodríguez (Eds.), *Estado del Ciclo del Carbono. Agenda Azul y Verde* (pp 529-572). Texcoco, Estado de México, México: Programa Mexicano del Carbono. Ecosistemas Terrestres.
- Pinkus-Rendón, M., Pinkus Rendón, M., & Ortega-Rubio, A. (2014). Recomendaciones para el manejo sustentable en las áreas naturales protegidas de México. *Investigación y Ciencia*, 22 (60), 102-110.
- Quiñónez-Barraza, G., Cruz-Cobos, F., Vargas-Larreta, B., & Hernández, F. J. (2012). Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del tocón para especies forestales de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(9), 23-39.
- Rackley, S. A. (2017). *Carbon Capture and Storage* (2da ed.). Butterworth-Heinemann.
- Razo-Zárate, R., Gordillo-Martínez, Alberto J., Rodríguez-Laguna, R., Maycotte-Morales, C., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2013). Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional "El Chico", Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 19 (2), 73-86. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v19n2/v19n2a5.pdf>
- Rodríguez, R., Jiménez, J., Aguirre, O.A., & Treviño, E.J. (2006). Estimación del Carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia UANL*, 9(2), 179-188.
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O., & Jurado-Ibarra, E. (2007). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino-pino en Iturbide, N.L. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 32 (101), 39-56.

- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O.A., Treviño-Garza, E.J., & Razo-Zárate, R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera el Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai*, 5(3), 317 -327.
- Rojas-García, F., De Jong, B., Martínez-Zurimendí, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass. *Annals of Forest Science*, 72 (6), 835-864.
- Ruiz-Díaz, C., Rodríguez-Ortiz, G., Lyva-López, J.C., & Enríquez-del Valle, J.R. (2014). Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México. *Naturaleza y Desarrollo* 12(I), 28-45.
- Rzedowski, J. (1991). Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. *Acta Botánica Mexicana*, (14), 3-21.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1ra. ed. digital). México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). Parque Nacional Cumbres de Monterrey. Consultado 20-08-2019 en <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/parque-nacional-cumbres-de-monterrey>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2015. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. (Edición 2015)*. México: Autor.
- Silva-Arredondo, F., & Návar-Cháidez, J. (2009). Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(2), 155-163
- Silva-Arredondo, F.M., & Návar-Cháidez J.J. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y Bosques* 18(1), 77-88.

- Silva-Arredondo, F.M., & Návar-Cháidez, J.J. (2010). Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 55-62.
- Sotomayor, J.R., Herrera, M.A., & León, J.C. (2003). Clasificación mecánica de la madera de 100 especies mexicanas. XII Congreso forestal mundial. Quebec, Canadá.
- Valderrama-López, C., Castillo-Vargas, J., Torres-Romero, J., Guzmán-Lenis, A., Forero-Ausique, V., Duque-Chaves, C., ... & Montenegro-Gómez, S. (2018). Capítulo 6 Secuestro y almacenamiento de carbono. In S.P. Montenegro-Gómez & J. Angel-Osorio (Eds.) *Servicios ecosistémicos: Un enfoque introductorio con experiencias del occidente colombiano* (pp. 106-117). Bogota D.C., Colombia.
- Valdez-Tamez, V., Foroughbakhch-Pournavab, R., & Garza C., J. (2004). Criterios fitogeográficos en la redelimitación del Parque Nacional Cumbres de Monterrey. *Ciencia UANL*, 7 (1). 29-34.
- Velázquez, A., François-Mas, J., Mayorga-Saucedo, R., Palacio, J.L., Bocco, G., Gómez-Rodríguez, G., ...& González-Medrano, F. (2001). *El inventario forestal nacional 2000. Bosque de Chapultepec*, 64, 12-19.
- Yepes, A., Sierra, A., Niño, L., López, M., Garay, C., Vargas, D., Cabrera, E. & Barbosa, A. (2016). Biomasa y carbono total almacenado en robledales del sur de los Andes Colombianos: aportes para el enfoque REDD+ a escala de proyectos. *Biología Tropical*, 64(1), 399-412.
- Yerena, J.I., Jiménez, J., Aguirre, O.A., Treviño, E.J., & Alanís, E. (2012). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(13), 49-56.